



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

**“EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL
PROPILENGLICOL MEDIANTE LA ADICIÓN DE
NANOPARTÍCULAS DE ALOFÁN”**

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: ALEX FERNANDO MARTÍNEZ QUISHPI

EDWIN ALEXIS VARGAS ROBAYO

DIRECTOR: Ing. TELMO JESÚS MORENO ROMERO

Riobamba-Ecuador

2019

DERECHO DE AUTOR

©2019, Alex Fernando Martínez Quishpi; y Edwin Alexis Vargas Robayo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA ESPOCH

Nosotros, Alex Fernando Martínez Quishpi y Edwin Alexis Vargas Robayo, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, 31 de julio de 2019



Alex Fernando Martínez Quishpi
Cedula de Identidad: 092275041-9



Edwin Alexis Vargas Robayo
Cedula de Identidad: 172433095-4

CERTIFICACIÓN DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, **EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL PROPYLENGLICOL MEDIANTE LA ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ALOFÁN**, realizado por los señores: **ALEX FERNANDO MARTÍNEZ QUISHPI y EDWIN ALEXIS VARGAS ROBAYO** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

FIRMA **FECHA**

2019-07-31

Ing. Telmo Jesús Moreno Romero
**DIRECTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**


2019-07-31

Dr. Jorge Efrén Silva Yumi
MIEMBRO DE TRIBUNAL


2019-07-31

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se la dedico de manera especial a mi madre por el apoyo incondicional y por haber creído en mí a lo largo de la carrera, a mi padre que, aunque no se encuentre con nosotros estaría muy feliz al verme lograr alcanzar este objetivo, de igual manera a mis hermanos porque han sido una inspiración para continuar preparándome.

ALEX FERNANDO MARTÍNEZ QUISHPI

Dedico este trabajo de investigación a toda mi familia, principalmente a mis padres: Ligia Robayo y Holguer Vargas por que han sido parte fundamental en mi formación personal y profesional, por brindarme su apoyo incondicional, confianza, consejos y recursos para lograrlo.

A mis hermanas, por sus palabras y compañía a lo largo de este camino.

A mi novia por su confianza y palabras, por su amor y apoyo al brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente.

EDWIN ALEXIS VARGAS ROBAYO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por tenerme con salud y vida y permitirme culminar mi carrera, también a toda mi familia y amigos quienes han formado parte de este proceso y me han brindado su apoyo y consejos, los cuales me han servido para lograr alcanzar este objetivo. También agradezco a esta digna institución y a todos los docentes que han sido parte de mi formación académica.

ALEX FERNANDO MARTÍNEZ QUISHPI

Agradezco a Dios por guiarme a lo largo de mi existencia, por la salud y haberme permitido lograr este paso muy importante en mi vida.

A mi familia, por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional y haber sido mi apoyo fundamental a lo largo de este tiempo.

De igual manera mis agradecimientos a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Carrera de Mecánica, a todos los docentes quienes con la enseñanza de sus conocimientos hicieron que pueda prepararme día a día como un buen profesional.

EDWIN ALEXIS VARGAS ROBAYO

TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN.	1

CAPÍTULO I

1	MARCO TEÓRICO	4
1.1	Nanopartículas.	4
1.2	Alofán.	5
1.2.1	Formación del alofán.....	6
1.2.2	Síntesis de Nanopartículas de alofán.....	8
1.2.2.1	Método de Co-precipitación.	8
1.2.2.2	Método Sol-Gel.	9
1.2.3	Método para la caracterización de Nanopartículas	9
1.2.3.1	SEM (Microscopio Electrónico de Barrido).....	9
1.2.4	Características estructurales	11
1.2.5	Composición química.....	12
1.3	Capacidad calorífica y calor específico.....	13
1.3.1	Medida de la capacidad calorífica y calores específicos.	13
1.3.1.1	Método de las mezclas.....	14
1.4	Nanofluidos.....	16
1.4.1	Materiales.....	17
1.4.2	Dispersión de nanopartículas en líquidos.....	17
1.4.3	Conductividad térmica en nanofluidos	18
1.4.4	Aplicaciones de nanofluidos.....	19
1.4.4.1	Aplicaciones automotrices.....	19
1.4.4.2	Aplicaciones biomédicas	20

1.4.4.3	<i>Aplicaciones en transferencia de calor</i>	20
1.4.4.4	<i>Aplicaciones electrónicas</i>	20
1.5	Sistemas de Refrigeración	20
1.5.1	Refrigerantes	21
1.5.2	Propiedades termodinámicas de los refrigerantes	22
1.5.2.1	<i>Temperatura</i>	22
1.5.2.2	<i>Presión</i>	22
1.5.2.3	<i>Densidad</i>	22
1.5.3	Propiedades físicas y químicas	23
1.5.4	Variables del proceso de refrigeración	23
1.5.4.1	<i>Caudal</i>	23
1.5.4.2	<i>Temperatura</i>	24
1.5.5	Calor	24
1.5.5.1	<i>Calor Latente</i>	24
1.5.5.2	<i>Calor sensible</i>	25
1.5.6	Curvas de enfriamientos	25
1.5.6.1	<i>Curva caudal vs tiempo</i>	25
1.5.6.2	<i>Curva temperatura vs tiempo</i>	25
1.6	Equipo de refrigeración chiller	25
1.6.1	Sistema de adquisición de datos	26
1.6.1.1	<i>Sensor de caudal</i>	26
1.6.1.2	<i>Sensor de Temperatura</i>	27
1.7	Anticongelantes utilizados en equipos chiller	28
1.7.1	Anticongelantes con base cloruro	28
1.7.2	Anticongelantes con base alcohol	28
1.7.3	Anticongelantes con base glicol	29
1.8	Propilenglicol	29
1.8.1	Aplicaciones de propilenglicol	30
1.8.2	Propiedades fisico-químicas	30
1.8.3	Ventajas del uso de propilenglicol	31
1.8.3.1	<i>Solubilidad</i>	31
1.8.3.2	<i>Punto de congelación</i>	31
1.8.3.3	<i>Presión de vapor y punto de ebullición</i>	31
1.8.4	Desventajas del uso de propilenglicol	31
1.8.4.1	<i>Corrosión</i>	31

1.8.4.2	Costo	32
1.8.4.3	<i>Durabilidad</i>	32
1.8.4.4	<i>Transferencia de calor</i>	32
1.8.5	<i>Nanopartículas suspendidas en propilenglicol</i>	32

CAPÍTULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	33
2.1	Materiales y Equipos	33
2.2	Verificación del funcionamiento adecuado del chiller	41
2.2.1	<i>Mantenimiento preventivo al equipo chiller.</i>	41
2.3	Método de síntesis de nanopartículas.	45
2.3.1	<i>Nanopartículas de alofán.</i>	45
2.4	Determinación de concentraciones.	51
2.4.1	<i>Concentración al 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán</i>	52
2.4.2	<i>Concentración al 21% de propilenglicol y 0,5 de alofán</i>	53
2.5	Elaboración del nanorefrigerante.	54
2.6	Procedimiento para determinar el calor específico del líquido refrigerante	54
2.6.1	<i>Determinación de la constante del calorímetro</i>	54
2.6.2	<i>Determinación del calor específico del líquido refrigerante</i>	55

CAPÍTULO III

3	EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS	56
3.1	Resultados de la Caracterización de nanopartículas de alofán	56
3.1.1	<i>Caracterización mediante microscopia electrónica de barrido (SEM)</i>	56
3.1.2	<i>Caracterización mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)</i>	58
3.2	Pruebas experimentales al 15% de propilenglicol y al 0,5% de alofán.	59
3.2.1	<i>Prueba N°1 con la válvula abierta al 100%</i>	59
3.2.2	<i>Prueba N°2 con la válvula abierta al 75%</i>	62
3.2.3	<i>Prueba N°3 con la válvula abierta al 50%</i>	64
3.2.4	<i>Curvas de enfriamiento al 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán</i>	66
3.3	Pruebas experimentales al 21% de propilenglicol y al 0,5% de alofán.	68
3.3.1	<i>Prueba N°4 con la válvula abierta al 100%</i>	68
3.3.2	<i>Prueba N°5 con la válvula abierta al 75%</i>	70

3.3.3	<i>Prueba N°6 con la válvula abierta al 50%.....</i>	72
3.4	<i>Curvas de enfriamiento al 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán.....</i>	75
3.5	<i>Análisis comparativo.....</i>	76
3.5.1	<i>Análisis comparativo al 15% de concentración.</i>	76
3.5.1.1	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 100%</i>	76
3.5.1.2	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 75%</i>	78
3.5.1.3	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 50%</i>	79
3.5.2	<i>Análisis comparativo al 21% de concentración</i>	81
3.5.2.1	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 100%</i>	81
3.5.2.2	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 75%</i>	83
3.5.2.3	<i>Análisis comparativo con la válvula abierta al 50%</i>	85
3.6	<i>Determinación de la capacidad calorífica.....</i>	87
3.6.1	<i>Constante del calorímetro.....</i>	87
3.6.2	<i>Calor específico de la mezcla agua-propilenglicol.....</i>	88
3.6.2.1	<i>Capacidad calorífica al 15% de propilenglicol.....</i>	88
3.6.2.2	<i>Capacidad calorífica al 21% de propilenglicol.....</i>	89
3.6.3	<i>Capacidad calorífica de la mezcla agua-propilenglicol-alofán.....</i>	90
3.6.3.1	<i>Capacidad calorífica al 15% de propilenglicol y 0,5 % de alofán.....</i>	90
3.6.3.2	<i>Capacidad calorífica al 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán.....</i>	91
3.6.4	<i>Análisis comparativo de la capacidad calorífica.....</i>	92
3.7	<i>Análisis del consumo de energía de las dos soluciones.</i>	92
3.7.1	<i>Calculo de la potencia consumida por la unidad condensadora.....</i>	92
3.7.2	<i>Calculo del consumo de energía para la concentración al 15%.</i>	93
3.7.3	<i>Calculo del consumo de energía para la concentración de 21%.....</i>	94
CONCLUSIONES		95
RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Características de los factores que influyen en la formación de arcilla alofánica	7
Tabla 2-1:	Ventajas y desventajas del SEM	10
Tabla 1-2:	Reactivos y Compuestos.....	33
Tabla 2-2:	Equipos utilizados en los laboratorios.....	35
Tabla 3-2:	Materiales.	38
Tabla 4-2:	Parámetros utilizados en la sintetización de alofán.....	45
Tabla 5-2:	Volúmenes para la elaboración del nanorefrigerante al 15% de propilenglicol.....	54
Tabla 6-2:	Volúmenes para la elaboración del nanorefrigerante al 21% de propilenglicol.....	54
Tabla 1-3:	Porcentaje de elementos presentes en el alofán sintético.	57
Tabla 2-3:	Parámetros de la experimentación N°1.	59
Tabla 3-3:	Resultados de la prueba N°1.....	60
Tabla 4-3:	Parámetros de la experimentación N°2.	62
Tabla 5-3:	Resultados de la prueba N°2.....	63
Tabla 6-3:	Parámetros de la experimentación N°3.	64
Tabla 7-3:	Resultados de la prueba N°3.....	64
Tabla 8-3:	Parámetros de la experimentación N°4.	68
Tabla 9-3:	Resultados prueba N°4.....	68
Tabla 10-3:	Parámetros de la experimentación N°5.	70
Tabla 11-3:	Resultados de la prueba N°5.....	71
Tabla 12-3:	Parámetros de la experimentación N°6.	72
Tabla 13-3:	Parámetros de la experimentación N°6.	73
Tabla 14-3:	Resultados del análisis de la velocidad de enfriamiento prueba N°1.....	78
Tabla 15-3:	Resultados del análisis de la velocidad de enfriamiento prueba N°2.....	79
Tabla 16-3:	Resultados obtenidos del análisis comparativo de la prueba N°3.....	81
Tabla 17-3:	Resultados obtenidos del análisis comparativo de la prueba N°4.....	82
Tabla 18-3:	Resultados obtenidos del análisis comparativo al 21%.....	84
Tabla 19-3:	Resultados obtenidos del análisis comparativo al 21%.....	86
Tabla 20-3:	Datos para el cálculo de la constante del calorímetro.	87
Tabla 21-3:	Datos para calcular la capacidad calorífica al 15% de propilenglicol.....	88
Tabla 22-3:	Datos para calcular la capacidad calorífica al 21% de propilenglicol.....	89
Tabla 23-3:	Datos para la solución 15% propilenglicol- 0.5% alofán.	90

Tabla 24-3:	Datos para la solución 21% propilenglicol- 0.5% alofán.	91
Tabla 25-3:	Valores obtenidos de la capacidad calorífica.	92
Tabla 26-3:	Análisis del consumo de energía.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Comparación de tamaños entre nm, micras y mm.	4
Figura 2-1:	Estructura de una nanopartícula de alofán.	5
Figura 3-1:	Mapa Global del recurso suelo.	5
Figura 4-1:	Área superficial del Ecuador cubierta por suelos de origen volcánico.	6
Figura 5-1:	Síntesis de alofán por el método de co-precipitación.	8
Figura 6-1:	Método Sol-Gel.	9
Figura 7-1:	Funcionamiento básico de un SEM.	10
Figura 8-1:	Morfología de la nanopartícula alofán.	11
Figura 9-1:	Microscopía electrónica de barrido del alofán.	11
Figura 10-1:	Estructura química de una nano esfera de alofán.	12
Figura 11-1:	Calorímetro y sus partes	14
Figura 12-1:	Elementos del Equipo Chiller.	26
Figura 13-1:	Ubicación del Caudalímetro.	27
Figura 14-1:	Colocación del sensor de caudal.	27
Figura 1-2:	Equipo Chiller.	41
Figura 2-2:	Estado inicial de las tuberías.	42
Figura 3-2:	Verificación del tablero de control del chiller.	42
Figura 4-2:	Limpieza y pintado del tanque de almacenamiento.	43
Figura 5-2:	Reemplazo de tuberías y aislamientos.	43
Figura 6-2:	Cambio de la bomba del equipo chiller	44
Figura 7-2:	Calibración de presiones del compresor	44
Figura 8-2:	Reemplazo del temporizador.	44
Figura 9-2:	Pesaje del nitrato de aluminio e hidróxido de sodio.	45
Figura 10-2:	Medición del volumen del silicato.	46
Figura 11-2:	Soluciones de Na_2SiO_3 y $\text{Na}(\text{OH})$	46
Figura 12-2:	Añadir Silicato de Sodio hasta tener un pH de 12.	47
Figura 13-2:	Mezcla de los químicos.	47
Figura 14-2:	Proceso de agitación.	48
Figura 15-2:	Centrifugación.	48
Figura 16-2:	Suspensión concentrada de alofán	49
Figura 17-2:	Proceso de lavado y sonificación.	49
Figura 18-2:	Obtención del alofán	50

Figura 19-2:	Muestras de la mezcla secadas.	50
Figura 1-3:	Tamaño de nanopartículas de alofán sintético.	56
Figura 2-3:	Aparición de escarcha en los elementos del equipo chiller	61
Figura 3-3:	Congelamiento del intercambiador de calor y de la bomba	69

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Temperatura de congelación de la solución del propilenglicol.....	51
Gráfico 1-3:	Elementos presentes en el alofán sintético.	57
Gráfico 2-3:	Espectro IR de alofán sólido.	58
Gráfico 3-3:	Espectro IR de alofán sintético con varias concentraciones iniciales.....	59
Gráfico 4-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°1.	62
Gráfico 5-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°2.	64
Gráfico 6-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°3.	66
Gráfico 7-3:	Variación de la temperatura vs tiempo para el 15% de concentración.	66
Gráfico 8-3:	Variación del caudal vs tiempo para el 15% de concentración.	67
Gráfico 9-3:	Velocidad de enfriamiento vs Temperatura al 15% de propilenglicol	67
Gráfico 10-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°4	70
Gráfico 11-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°5.	72
Gráfico 12-3:	Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°6.	74
Gráfico 13-3:	Variación de temperatura vs tiempo para el 21% de concentración.....	75
Gráfico 14-3:	Variación del caudal vs tiempo para el 21% de concentración.	75
Gráfico 15-3:	Velocidad de enfriamiento vs Temperatura al 15% de propilenglicol.	76
Gráfico 16-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 100%.....	77
Gráfico 17-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 100%.....	77
Gráfico 18-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 75%.....	78
Gráfico 19-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 75%.....	79
Gráfico 20-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 50%.....	80
Gráfico 21-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 50%.....	80
Gráfico 22-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 100%	81
Gráfico 23-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 100%.....	82
Gráfico 24-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula al 75%	83
Gráfico 25-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 75%.....	84
Gráfico 26-3:	Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula al 50%	85
Gráfico 27-3:	Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 50%.....	86

LISTA DE ABREVIACIONES

AS	Alofán Sintético
NPs	Nanopartículas
NFs	Nanofluidos
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
IR	Infrarrojo

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Relación de la densidad con la temperatura para diferentes concentraciones de propilenglicol.
- Anexo B:** Relación de la viscosidad con la temperatura para diferentes concentraciones de propilenglicol.
- Anexo C:** Relación del calor específico con la temperatura para diferentes concentraciones de propilenglicol.
- Anexo D:** Relación de la conductividad térmica con la temperatura para diferentes concentraciones de propilenglicol.
- Anexo E:** Programación en el software LabView.

RESUMEN

Se presenta como una alternativa para mejorar el desempeño de los sistemas de refrigeración con la incorporación de nanofluidos, y tiene como objetivo efectuar pruebas experimentales utilizando nanopartículas de alofán y propilenglicol como fluido base con la finalidad de determinar su capacidad calorífica. La ejecución del trabajo inicio con la sintetización de nanopartículas de alofán las cuales se mantuvieron suspendidas en agua para su posterior análisis y caracterización mediante los siguientes métodos: espectroscopia de infrarrojo y microscopia electrónica de barrido. Las concentraciones con las que se trabajó son de 15 por ciento y 21 por ciento en volumen de propilenglicol, las dos al 0,5 por ciento de concentración de nanopartículas de alofán para un volumen de solución de 180 litros. Las pruebas experimentales se realizaron en el equipo técnico “chiller” que permitió que la solución pueda enfriarse desde la temperatura ambiente hasta una temperatura cercana a los menos 10 grados centígrados dependiendo de las propiedades de la solución, estos datos se pudieron obtener mediante una interfaz de usuario del software LabView. Los datos obtenidos nos sirvieron para graficar las curvas de enfriamiento a diferentes concentraciones, así como también para la determinación de la velocidad de enfriamiento, luego se hizo un análisis comparativo con las curvas de enfriamiento elaboradas bajo las mismas condiciones en proyectos anteriores. Finalmente, se procedió a determinar el calor específico de las soluciones que contienen nanopartículas de alofán y se verificó su mejora en comparación con las soluciones a base de propilenglicol. Los resultados obtenidos fueron favorables, ya que efectivamente se comprobó que la adición de nanopartículas de alofán produce una mejora considerable en las propiedades termodinámicas de los fluidos base y aumenta su transferencia de calor, por lo que se recomienda el uso de nanopartículas de alofán en sistemas de refrigeración y su estudio en otras áreas de aplicación.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <REFRIGERACIÓN>, <NANOPARTÍCULAS DE ALOFÁN>, <PROPILENGLICOL>, <REFRIGERANTE SECUNDARIO>, <CURVA DE ENFRIAMIENTO>, <CAPACIDAD CALORÍFICA>.



ABSTRACT

It is presented as an alternative to improve the performance of refrigeration systems with the incorporation of nanofluids, and aims to perform experimental tests using nanoparticles of allophane and propylene glycol as a base fluid in order to determine its heat capacity. The execution of the work started with the synthesis of allophane nanoparticles which were suspended in water for further analysis and characterization using the following methods: infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. The concentrations worked with are 15 percent and 21 percent by volume of propylene glycol, both at 0.5 percent concentration of allophane nanoparticles for a volume of solution of 180 liters. The experimental tests were carried out in the "chiller" technical equipment that allowed the solution to be cooled from the ambient temperature to a temperature close to minus 10 degrees Celsius depending on the properties of the solution, this data could be obtained through an interface of user of the LabView software. The data obtained served to record the cooling curves at different concentrations, as well as for the determination of the cooling rate, then a comparative analysis was made with the cooling curves prepared under the same conditions in previous projects. Finally, we proceeded to determine the specific heat of the solutions containing allophane nanoparticles and its improvement was verified in comparison with the propylene glycol-based solutions. The results obtained were favorable, since it was verified that the addition of allophane nanoparticles produces a considerable improvement in the thermodynamic properties of the base fluids and increases their heat transfer, therefore, it is recommended the use of allophane nanoparticles in refrigeration systems and their study in other areas of application.

KEYWORDS: <TECHNOLOGY, AND ENGINEERING SCIENCES>, <REFRIGERATION>, <ALLOPHANE NANOPARTICLES>, <PROPYLENE GLYCOL>, <SECONDARY REFRIGERANT>, <CURVE OF COOLING>, <HEAT CAPACITY>.



INTRODUCCIÓN.

El proceso de refrigeración es empleado en diversas industrias, “ya sea con la finalidad de conservación, acondicionamiento de aire o cualquier tipo de proceso donde se requiera el enfriamiento de un medio”. Existe una diversidad de equipos cuya función es realizar el intercambio de calor para la refrigeración, entre los cuales tenemos: torres de enfriamiento, torres de evaporación, equipos chiller, refrigeradores, etc. Estos equipos se ajustan a distintos usos y aplicaciones (Guaman & Muñoz, 2017, p. 1).

El equipo de refrigeración chiller funciona como un sistema indirecto en donde el refrigerante primario no se encuentra en contacto con el medio enfriado, por lo cual se tiene una disminución de carga del refrigerante primario y fugas. Este equipo de refrigeración es usado en aplicaciones industriales y comerciales, tales como: aire acondicionado, industria mecánica y de polímeros como enfriador de máquinas, conservación de productos alimenticios (Melinder, 2010; citado en Guaman & Muñoz, 2017).

Debido a que los sistemas de refrigeración tienen una gran demanda se opta por analizarlos con el fin de optimizarlos (Moreno, et al., 2018, p. 420), una alternativa de mejoramiento es la incorporación de fluidos con características adecuadas para las distintas aplicaciones, para lograr que los fluidos tengan excelentes propiedades físicas y químicas se mezcla partículas metálicas solidas con refrigerantes (Cueva & Nole, 2016).

Según estudios realizados para determinar la capacidad calorífica de nanofluidos de monóxido de cobre, dióxido de titanio, dióxido de silicio, alúmina y cobre al ser suspendidos en fluidos base tales como: agua desionizada, propilenglicol y etilenglicol; demuestran que existe un incremento en sus propiedades termodinámicas en comparación con las del fluido base y varían de acuerdo al porcentaje de concentración (Zhou, et al., 2015, p. 1).

En los últimos años se ha intensificado el estudio de nanofluidos y su aplicación en diferentes áreas de ingeniería tales como: sistemas de calefacción y enfriamiento, reactores nucleares, componentes electrónicos; obteniendo resultados favorables en la mejora de transferencia de calor. En un estudio realizado se comprobó que al añadir nanopartículas de alúmina en agua, su conductividad térmica incrementó en un 30% (Che, et al., 2015).

Justificación de la investigación.

Este proyecto se realiza con la finalidad de contribuir al conocimiento existente sobre el uso de nanopartículas en refrigerantes secundarios; el cual surge como una necesidad de la búsqueda de mejoras en sus propiedades termodinámicas, los cuales son utilizados en diversas aplicaciones en la industria de refrigeración, y así suplir la demanda tecnológica actual existente.

Para la experimentación se eligió al propilenglicol como refrigerante secundario ya que es un fluido manejable y posee excelentes propiedades, como nanopartícula se escogió al alofán ya que su estructura es una especie de combinación de óxidos de silicio y aluminio hidratados, cuyos resultados podrá sistematizarse en una propuesta para ser incorporado como conocimiento a la Escuela de Ingeniería Mecánica.

La elaboración y aplicación de este proyecto una vez demostrada su validez y confiabilidad podrán ser utilizados como base en otros trabajos de investigación y en otras instituciones educativas, incentivando a la utilización de nanopartículas en refrigerantes.

Alcance

Mediante la elaboración de este proyecto de investigación se determinará el comportamiento de un refrigerante secundario con la adición de nanopartículas de alofán, al analizar las curvas de enfriamiento y compararlas con un proyecto realizado anteriormente.

Para poder realizar las curvas de enfriamiento se tomará los datos obtenidos mediante las pruebas experimentales que se hará al nanofluido a diferentes concentraciones en el equipo de refrigeración chiller.

Objetivos.

Objetivo general

Evaluar de la capacidad calorífica del propilenglicol mediante la adición de nanopartículas de alofán.

Objetivos Específicos

- Compilar información relevante acerca del alopán y del propilenglicol.
- Realizar las pruebas experimentales en el equipo de refrigeración chiller para la obtención de datos.
- Determinar la capacidad calorífica con diferentes concentraciones de propilenglicol.
- Realizar un análisis comparativo con resultados obtenidos en investigaciones anteriores sin adición de alopán.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Nanopartículas.

Una nanopartícula, también conocida como nanocrystal o nanopolvo, es una partícula con dimensiones microscópicas con un tamaño mayor a 1 nanómetro (nm) pero menor a los 100nm. En la actualidad se han convertido en objeto de intensa investigación tecnológica, por sus diversas aplicaciones en los diferentes campos de ingeniería, energía, medicina, medio ambiente entre otros (Taylor , et al., 2013).

Las nanopartículas se las puede obtener de forma artificial o natural. Entre las de origen natural están: polvo, bacterias, virus y partículas emitidas debido a emisiones de volcanes. Las nanopartículas artificiales son sintetizadas, entre las cuales tenemos: nanofibras de carbono, nanohilos, nanopartículas metálicas, entre otros (Hussein, et al., 2013).

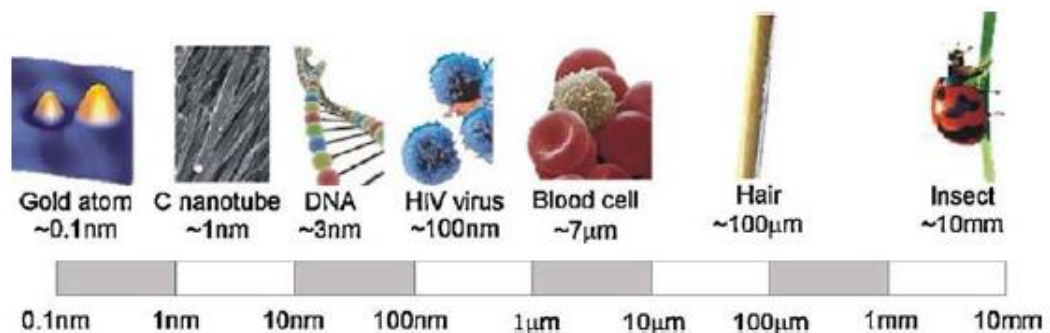


Figura 1-1: Comparación de tamaños entre nm, micras y mm.

Fuente: (Lagarde Soto, 2015, p. 18).

1.2 Alofán.

Es una nanopartícula natural que se encuentra en suelos de origen volcánico, derivados fundamentalmente de cenizas, debido a procesos de meteorización en climas húmedos bajo condiciones ácidas. Son definidos como una serie de aluminosilicatos que tiene una composición química variada con presencia de uniones Si-O-Al. Presenta una gran área superficial, alta porosidad y carga variable lo que permite diversas aplicaciones potenciales (Besoain, 1985; citado en Varela, 2016).

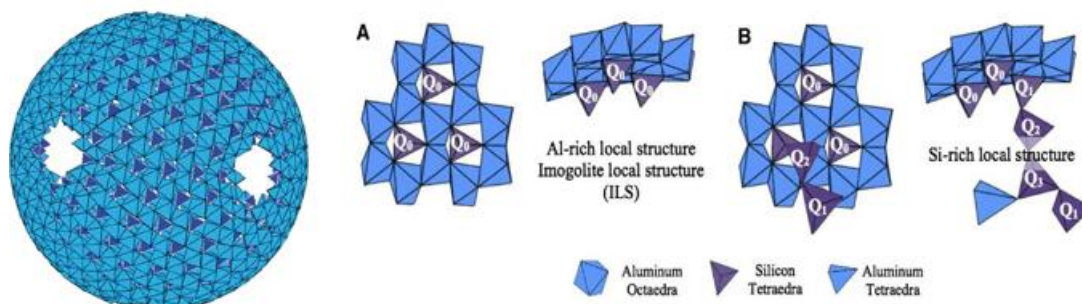


Figura 2-1: Estructura de una nanopartícula de alofán.

Fuente: (Levard, et al., 2012).

Las nanopartículas de alofán se las pueden encontrar en andosoles de forma natural, los andosoles son suelos formados de materiales volcánicos. Se puede encontrar en países ubicados alrededor del cinturón de fuego del pacífico (Silva, et al., 2017, p. 2).

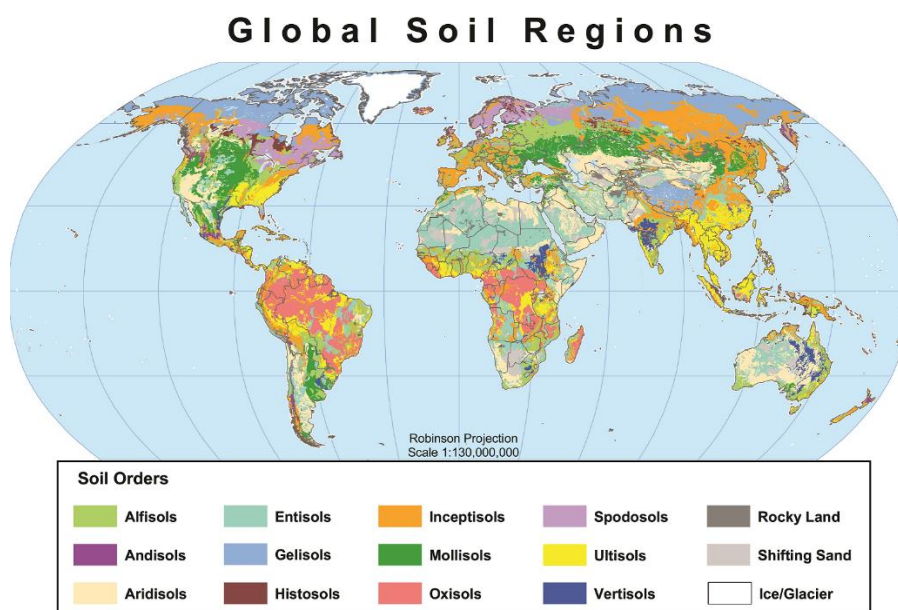


Figura 3-1: Mapa Global del recurso suelo.

Fuente: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/?cid=nrcs142p2_054013

Los andosoles en el Ecuador constituyen el 30% (60593 km²) de la superficie territorial como se observa en la Figura 4-1. Estos suelos se encuentran alrededor de la región sierra centro-norte en zonas altas y húmedas; tienen una baja densidad aparente, alto contenido de materia orgánica y alta retención de humedad (Silva, et al., 2017).

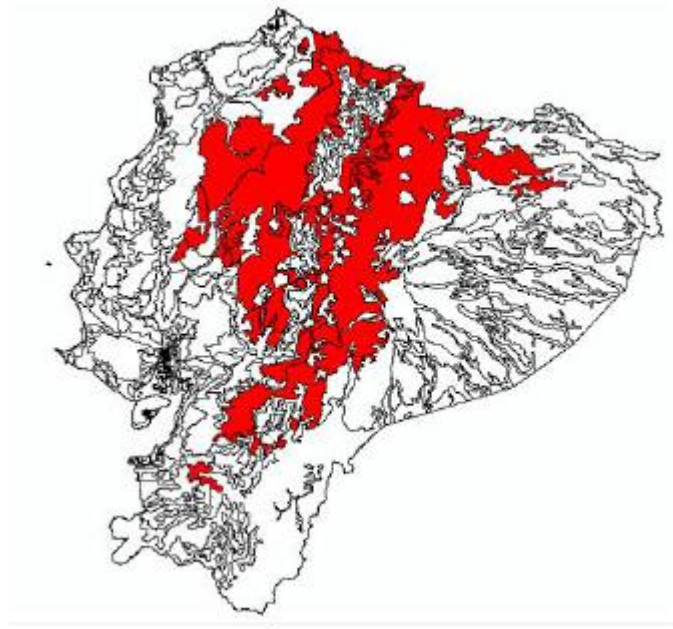


Figura 4-1: Área superficial del Ecuador cubierta por suelos de origen volcánico.

Fuente: (Silva, et al., 2017).

1.2.1 Formación del alofán

La formación del alofán se produce por la rápida alteración del material contenido en las rocas volcánicas en presencia de materia orgánica, al tener un pH aproximado de 5, el silicio (Si) y el aluminio (Al) se separan del material volcánico, reaccionando y formando así el alofán, otros de los minerales que se forman en este tipo de suelos son la halloysita e imogolita. La formación de alofán, halloysita o imogolita depende del contenido de materia orgánica y de las condiciones a las que está sometida como: la presión y temperatura (Ndayiragije & Delvaux, 2003, p. 203).

A continuación, en la tabla 1-1, se detalla las características ideales para la formación de alofán.

Tabla 1-1: Características de los factores que influyen en la formación de arcilla alofónica.

Factor de alteración	Características para la Formación de Arcilla alofónica
Nivel de precipitación anual	La formación de arcilla alofónica requiere altos niveles de precipitación, mayores a 800 mm/año.
Topografía	Topografías que permiten el fácil escurrimiento del agua en el suelo, mejorando el drenaje, la lixiviación del vidrio volcánico y el arrastre de sílice disuelta, favorecen la formación de arcillas alofónicas.
Temperatura	A mayor temperatura se acelera el proceso de meteorización, facilitando la formación de arcilla alofónica (Wada, et al., 2006).
Composición del vidrio volcánico	Los vidrios coloreados, por su morfología y composición, se alteran con mayor facilidad. Además, la mayor liberación de Mg y Ca, mantienen el agua a un pH sobre 4.9, favoreciendo la formación de arcilla alofónica. Vidrios no coloreados generan una reacción que acidifica el suelo inhibiendo la formación de arcilla alofónica (Paredes Peñafiel, 2005).
pH	La formación de arcilla alofónica se acelera con pH entre 4.9 y 7. Bajo 4.9 la formación de alofán se inhibe.
Materia Orgánica	Al descomponerse la materia orgánica que se encuentra en contacto con el vidrio volcánico, acidifica el suelo, inhibiendo la formación de arcilla alofónica.
Tiempo	Las partículas de alofán e imogolita poseen una vida media aproximada de 25.000 años , luego se transforman, en el caso particular de Chile, en arcillas de tipo Halloysitas.

Fuente: (González, 2012, p. 18).

Realizado por: Autores

Las nanopartículas de alofán se las puede extraer de andosoles mediante el proceso siguiente: eliminación de materia orgánica, eliminación de óxidos de hierro y separación de las fracciones nanométricas (Silva, et al., 2017).

1.2.2 Síntesis de Nanopartículas de alofán.

La síntesis de las nanopartículas de alofán se las puede realizar por el método de co-precipitación o por el método de sol-gel. Estos dos métodos son descritos a continuación.

1.2.2.1 Método de Co-precipitación.

Es un método de síntesis de nanopartículas de precipitación controlado (MPC), el cual consiste en la variación de pH, temperatura, evaporación del solvente, adición de un ácido o una base para la obtención de partículas homogéneas (Gupta & Tripathi, 2011).

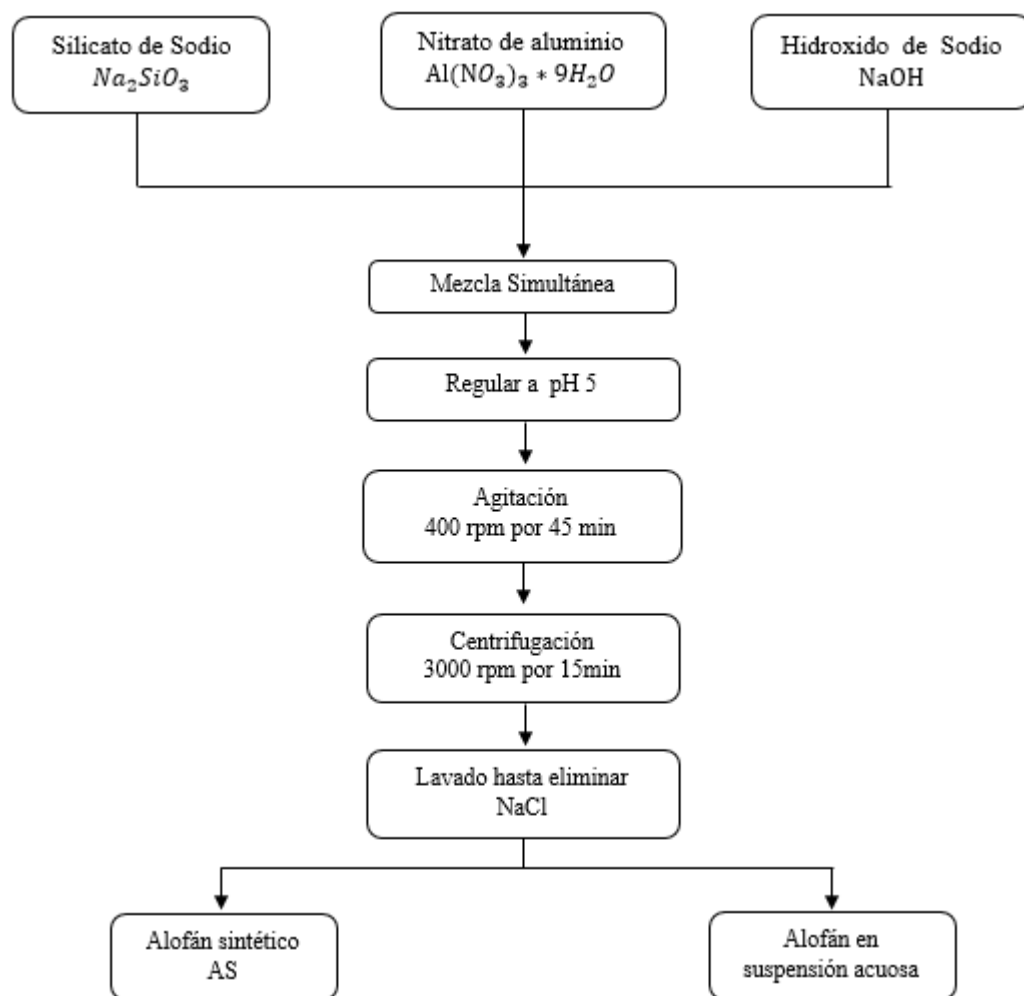


Figura 5-1: Síntesis de alofán por el método de co-precipitación.

Realizado por: Autores.

1.2.2.2 Método Sol-Gel.

Es un método químico, en el cual se forma una red en fase líquida continua conocida como gel mediante la síntesis de una suspensión coloidal de partículas en un líquido llamado sol y la gelación (hidrólisis y condensación) del sol. Este tipo de proceso se lo realiza a temperatura ambiente durante un tiempo determinado en donde se deja reposar el solvente y se procede a extraer el gel, luego se elimina el solvente y agua excedente. En la figura 6-1 se ilustra el método de síntesis sol-gel (Castañeda Contreras, 2016).

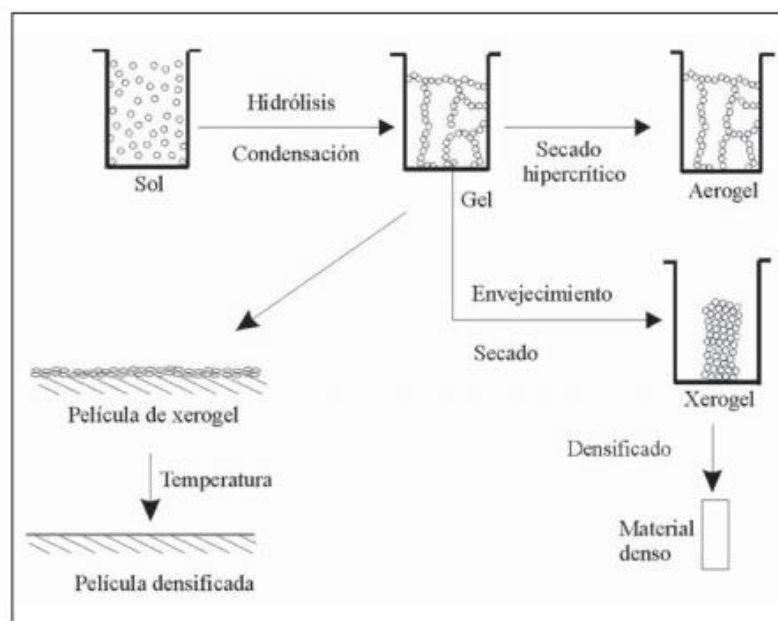


Figura 6-1: Método Sol-Gel.

Fuente: (Castañeda Contreras, 2016).

1.2.3 Método para la caracterización de Nanopartículas

La caracterización de nanopartículas tiene como finalidad conocer el tamaño y la estructura de las mismas. La técnica o método de caracterización es el SEM (Microscopio Electrónico de barrido) (Chamé Fernández, 2013).

1.2.3.1 SEM (Microscopio Electrónico de Barrido).

El método SEM es una técnica de caracterización superficial no destructiva, en la cual se obtiene la composición química e información morfológica de los materiales. Debido a la rapidez y al detalle en la adquisición de las micrografías de superficie este tipo de método es ampliamente utilizado en varios campos como: geociencias, ciencias ambientales, materiales, biología, etc. (Labrada Delgado & Peña Maldonado, s.f.).

El microscopio electrónico de barrido está compuesto por un sistema óptico-electrónico, el cual analiza la muestra por medio de un haz móvil de electrones generando diversas radiaciones al interactuar los electrones con la materia. Los electrones atraviesan la columna a través del sistema óptico de lentes electromagnéticas, al llegar a la muestra un generador de barrido realiza el movimiento del haz de electrones y se escanea toda la muestra (López Hernández, s.f.).

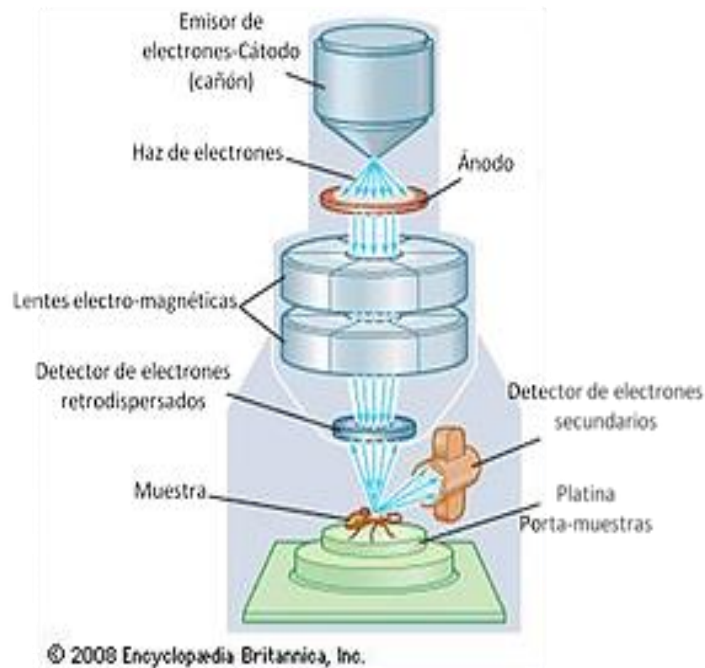


Figura 7-1: Funcionamiento básico de un SEM.

Fuente: (Labrada Delgado & Peña Maldonado, s.f.).

En la tabla 2-1, se describe algunas ventajas y desventajas del uso del microscopio electrónico de barrido (SEM).

Tabla 2-1: Ventajas y desventajas del SEM

Ventajas	Desventajas
Operación de fácil manejo y rápida.	En ciertas muestras principalmente biológicas puede provocar artefactos.
Se puede observar objetos más grandes que en un TEM.	Un microscopio SEM conlleva un alto coste económico.
Facilita una gran profundidad de campo.	Solamente se pueden analizar estructuras superficiales y con menor resolución que un microscopio de transmisión.
En la mayoría de casos la muestra no requiere preparación.	En materiales orgánicos las condiciones de vacío y espacio limitado de la cámara del espécimen condicionan el tamaño máximo de la muestra y preparación.

Fuente: (López Hernández, s.f.).

Realizado por: Autores.

1.2.4 Características estructurales

La nanopartícula alofán presenta una estructura no cristalina, la cual no es amorfa ni completamente cristalina. La nanopartícula de alofán tiene la forma de una esfera porosa con diámetro externo entre 3,5 y 5 nm, radio interno entre 1 y 2 nm, espesor entre 0,7 y 1 nm, poros con diámetro alrededor de 0,3-0,4 nm, y presenta un área superficial específica medida con etilenglicol monoetil éter que oscila entre 400-900 $m^2 g^{-1}$. (Levard, et al., 2012).

Las partículas de alofán pueden tener dos morfologías, como se ilustra en la Figura 8-1. La primera tiene una forma esferoidal hueca con dimensiones de hasta 5nm de diámetro exterior y 3.5 nm de diámetro interior, en dicha superficie posee poros que se producen por un defecto de la terminación en la estructura de las cadenas atómicas. La segunda morfología tiene una forma anular hueca discontinua que, al igual que la primera, posee poros cuyo tamaño es superior a los 0.35nm. el espesor de pared de ambas morfologías es aproximadamente a 1nm (Varela , 2016).

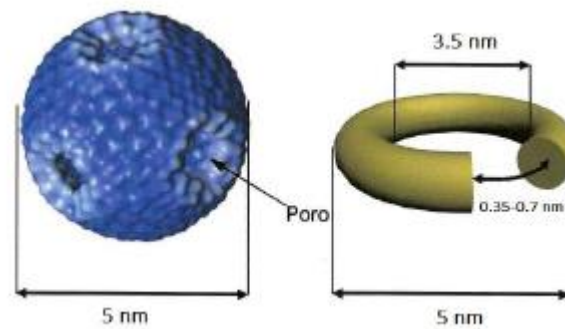


Figura 8-1: Morfología de la nanopartícula alofán.

Fuente: (González, 2012, p. 19).

En la figura 9-1 se muestran fotografías de nanopartículas de alofán obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido.

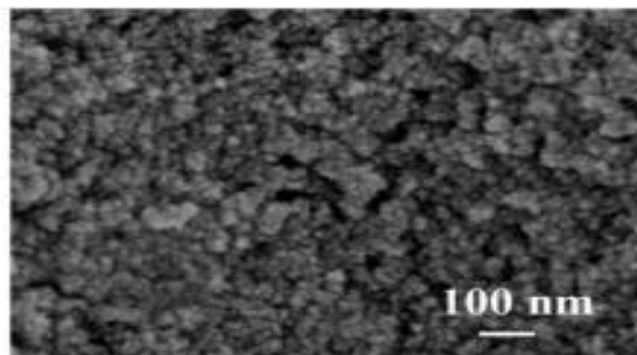


Figura 9-1: Microscopía electrónica de barrido del alofán.

Fuente: (Arakawa, et al., 2014, p. 2)

La estructura y morfología de la partícula de alofán son capaces de retener grandes cantidades de agua. En su superficie exterior, el agua se retiene en forma de monocapa, en sus poros, formando parte de su estructura, y en su interior, debido al paso de moléculas de agua por poros de diámetro superiores a 0.3 nm. Las irregularidades en la estructura suelen generar entre 8 a 12 poros por esférulo (Varela , 2016).

1.2.5 Composición química

La composición química del alofán, su estructura está formado por Al_2O_3 (1.3-2) $SiO_2 \cdot nH_2O$, donde n puede tomar el valor alrededor de 3. De acuerdo a la razón entre la cantidad de aluminio y sílice es que un alofán puede ser catalogado como rico en sílice (1: 1, $Al: Si$) o rico en aluminio (2: 1, $Al: Si$). De la misma manera, a partir de la razón entre ($SiO_2: Al_2O_3$) se dice que un suelo alofánico está compuesto por más partículas de alofán si la razón anterior se encuentra en el rango 1.2 – 2 (Besoain, 1985; citado en Lagarde Soto, 2015).

En la figura 10-1 se ilustra el ordenamiento atómico de una nanoesfera de alofán.

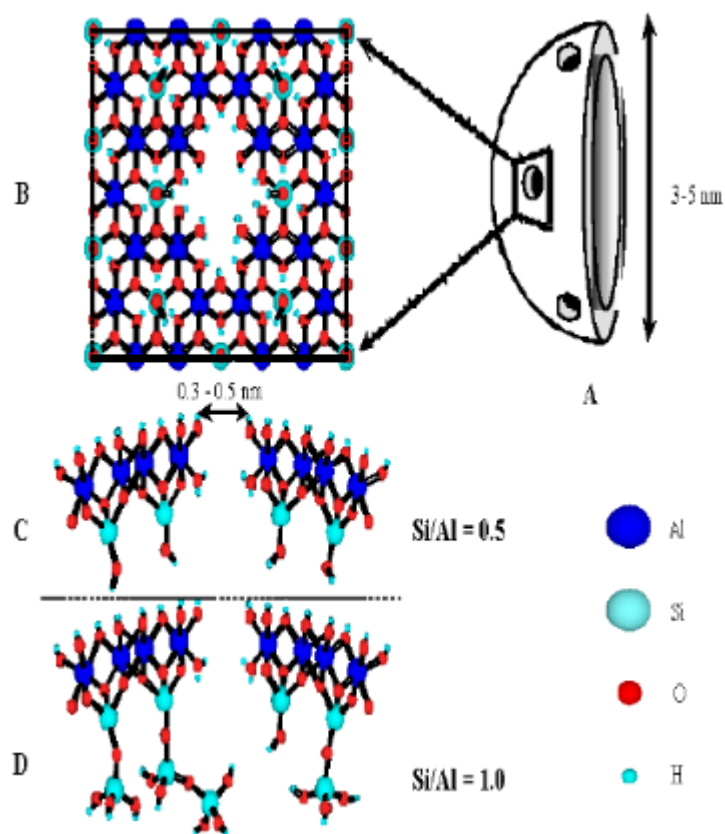


Figura 10-1: Estructura química de una nano esfera de alofán.

Fuente: (Ghoneim, et al., 2006).

1.3 Capacidad calorífica y calor específico.

Capacidad Calorífica. – Es la cantidad de energía que se necesita para aumentar la temperatura de una sustancia mediante la absorción de calor sensible. Debido a que depende de la masa que forma un sistema la capacidad calorífica es una propiedad extensiva (Aeberhard & Aerberhard, s.f.). Para calcular la capacidad calorífica se emplea la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

Donde:

$$C = \text{Capacidad calorífica.} \left[\frac{J}{^{\circ}K} \right] \text{ ó } \left[\frac{cal}{^{\circ}K} \right]$$

$$Q = \text{Calor absorbido por el sistema.} [J] \text{ ó } [cal]$$

$$\Delta T = \text{Variación de la temperatura.} [^{\circ}K] \text{ ó } [^{\circ}C]$$

Calor Específico. -Es una propiedad intensiva que se define como “la energía requerida para aumentar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia” (Quispe Meza & Taza Ordoñez, 2017, p. 18) El calor específico se define por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2)$$

Donde:

$$c = \text{Calor específico.} \left[\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}K} \right]$$

$$C = \text{Capacidad calorífica.} \left[\frac{J}{^{\circ}C} \right]$$

$$m = \text{Masa de la sustancia.} [Kg]$$

1.3.1 Medida de la capacidad calorífica y calores específicos.

El valor de la capacidad calorífica puede variar dependiendo del proceso al que esté sometido un sistema. Para un proceso a volumen constante, la ecuación que representa la capacidad calorífica viene dada por la siguiente relación (Aeberhard & Aerberhard, s.f., p. 4):

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} \quad (3)$$

Para un proceso en donde la presión constante, la ecuación de la capacidad calorífica se expresa por la siguiente relación:

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} \quad (4)$$

En donde Q_v y Q_p son las cantidades de calor intercambiadas a volumen y presión constante respectivamente. Los valores de C_v y C_p en un líquido o un sólido son muy parecidos mientras que en un gas son diferentes. Los métodos utilizados para medir la capacidad calorífica y el calor específico son: el método de las mezclas y el método eléctrico.

El primero nos da un valor aproximado del calor específico en un valor de temperatura cercano a la temperatura ambiente. El método eléctrico es de uso exclusivo debido a que las medidas tienen un elevado grado de precisión (Aeberhard & Aerberhard, s.f.).

1.3.1.1 Método de las mezclas.

Para realizar este método es necesario conocer el valor de la constante del calorímetro, la cual es determinada experimentalmente. Luego se introduce una cantidad conocida de agua en el calorímetro a una temperatura determinada, a continuación, se coloca una cantidad de masa de la sustancia a analizar y a una temperatura superior. Al alcanzar el equilibrio térmico entre el agua y la sustancia a analizar se procede a medir el aumento de temperatura (Aeberhard & Aerberhard, s.f.).

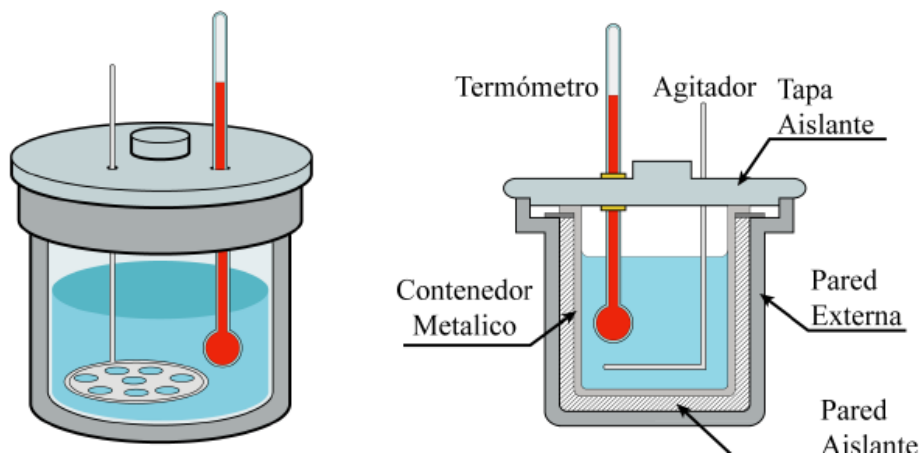


Figura 11-1: Calorímetro y sus partes

Fuente: (Flores Herrero, 2012, p. 2)

Para medir el calor transferido de un cuerpo a otro se aplica el principio de conservación de energía que nos dice que la suma algebraica de todos los calores de los cuerpos que interactúen en un sistema es igual a cero. La calorimetría utiliza este principio y nos permite calcular el calor específico de un cuerpo experimentalmente (Flores Herrero, 2012, p. 1).

Para calcular la constante del calorímetro utilizamos las siguientes ecuaciones (Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, 2010, p. 3):

$$Q_A = (m_1 + K) * C_e (t_3 - t_1) \quad (5)$$

$$Q_C = m_2 * C_e (t_2 - t_3) \quad (6)$$

Igualando ecuación (5) y (6).

$$Q_A = Q_C$$

Despejando K obtenemos:

$$K = m_2 \frac{t_2 - t_3}{t_3 - t_1} - m_1 \quad (7)$$

Donde:

$Q_A =$ Cantidad de calor del agua [kJ]

$Q_C =$ Cantidad de calor del calorímetro[kJ]

$m_1 =$ Masa de agua fría[Kg]

$m_2 =$ Masa de agua caliente[Kg]

$t_1 =$ Temperatura del agua fría[°C]

$t_2 =$ Temperatura del agua caliente[°C]

$t_3 =$ Temperatura de equilibrio[°C]

$C_e =$ Calor específico del agua $\left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right]$

$K =$ Constante del calorímetro[Kg]

Para el cálculo del calor específico de la sustancia problema aplicaremos la siguiente ecuación (Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, 2010):

$$C_e = \frac{C_p(m_1+K)(t_3-t_1)}{m_2(t_2-t_3)} \quad (8)$$

Dónde:

$$C_p = \text{Calor específico del agua} \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right]$$

$$C_e = \text{Calor específico de la sustancia problema} \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right]$$

$$m_1 = \text{Masa de agua fría} [Kg]$$

$$m_2 = \text{Masa de la sustancia problema} [Kg]$$

$$t_1 = \text{Temperatura del agua fría} [^\circ C]$$

$$t_2 = \text{Temperatura de la sustancia problema} [^\circ C]$$

$$t_3 = \text{Temperatura de equilibrio} [^\circ C]$$

$$K = \text{Constante del calorímetro} [Kg]$$

1.4 Nanofluidos

Un nanofluido es la dispersión de nanopartículas en un fluido base (agua, aceites, propilenglicol, etc.), convirtiéndose en suspensiones coloidales a nanoescala. Los nanofluidos mejoran las propiedades termofísicas como: conductividad térmica, difusividad térmica, la viscosidad y coeficientes de transferencia de calor (Cueva & Nole, 2016).

Se ha encontrado que un nanofluido tiene mejor conductividad térmica que un fluido convencional. Existe una serie de ventajas de usar nanofluidos en comparación de los fluidos convencionales, como la estabilidad de la suspensión, la no obstrucción en los sistemas y poca caída de presión. Es debido al tamaño nanométrico de las partículas y la concentración de las nanopartículas utilizadas es muy pequeña (Bhanvase, et al., 2018).

Se han realizado varias pruebas experimentales para comprender mejor el comportamiento de estos fluidos y sus características. Los estudios se han centrado en la conductividad térmica, coeficiente de transferencia de calor, viscosidad, fenómeno de la evaporación, la influencia del

tamaño de partícula y la concentración óptima de nanopartículas. Algunas de las ventajas de utilizar nanofluidos son (Saidur, et al., 2011):

- Alta superficie específica y por lo tanto se transfiere mayor calor superficial entre fluidos y partículas.
- Estabilidad de las partículas en el fluido base.
- Potencia de bombeo reducida en comparación con el fluido base.
- Partículas de obstrucción reducidas en comparación con las suspensiones convencionales, promoviendo la miniaturización del sistema.
- Propiedades ajustables variando la concentración de partículas.

1.4.1 Materiales

Los materiales empleados para la elaboración de nanofluidos pueden ser (Cueva & Nole, 2016):

- Semiconductores (SiC).
- Carburos (SiC, TiC).
- Óxidos (SiO_2, TiO_2, CuO).
- Nanotubos de carbono.
- Metales (Cu, Ag, Au).
- Nitruros (AlN, SiN).

Los fluidos que comúnmente se utilizan para realizar los nanofluidos son: etilenglicol, propilenglicol, agua, entre otros (Guerra Garcés, 2012, p. 11).

1.4.2 Dispersión de nanopartículas en líquidos

Las suspensiones de nanopartículas en un fluido han atraído gran interés debido a su variedad de aplicaciones, la dispersión debe ser homogénea para que permita aprovechar al máximo las propiedades de las nanopartículas (Nguyen, et al., 2014, p. 149).

Para dispersar las nanopartículas y disminuir la aglomeración se utilizan agentes surfactantes y equipos ultrasónicos, la adición de agentes surfactantes no es recomendada debido a que puede afectar el desempeño en la transferencia de calor de los nanofluidos (Wang & Mujundar, 2008).

Según (Cueva & Nole, 2016) para dispersar NPs se deben seguir los siguientes pasos:

- Selección de nanopartículas.
- Obtención de nanopartículas (atomización, métodos químicos, deposición).
- Microscopia de las nanopartículas.
- Calculo de la cantidad requerida de nanopartículas.
- Selección del surfactante (iónico, no iónico, anfóteros).
- Calculo del volumen requerido del surfactante.
- Sonicar el nanofluido (ultrasonido).

1.4.3 Conductividad térmica en nanofluidos

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o a sustancias con las que está en contacto (Incropera & Dewitt, 1999).

Debido a la gran cantidad de aplicaciones y mejoras de procesos la conductividad térmica de los nanofluidos es uno de los temas más estudiados últimamente (Saidur, et al., 2011), según investigaciones anteriores utilizando nanopartículas de cobre (Cu) en etilenglicol la conductividad térmica aumenta en un 40%, mientras que en nanofluidos de cobre y agua se obtuvo una mejora del 23,8% (Guerra Garcés, 2012, p. 13).

La comprensión convencional de la conductividad térmica efectiva de las mezclas se origina a partir de formulaciones de medios continuos que implican típicamente solo la fracción volumétrica, tamaño, forma de la partícula y asumir la transferencia de calor difusiva en ambas fases, sólido y fluido. Este método puede dar una mejor predicción para sistemas sólido-líquido con partículas más grandes, de tamaño microscópico, pero no explica las características inusuales de transferencia de calor en nanofluidos (Ortiz, 2014).

1.4.4 Aplicaciones de nanofluidos

En la actualidad la nanotecnología está siendo muy utilizada o considerada para uso en muchas aplicaciones específicas con la finalidad de proporcionar suministros de energía de forma eficiente y limpia (Saidur, et al., 2011).

Muchas de estas aplicaciones pueden no afectar a la transmisión de energía directamente, cada una tiene el potencial de disminuir la necesidad de utilizar gas natural, electricidad, combustible derivado del petróleo o de otro medio serían movidos a través del sistema de transmisión de energía. La generación de energía más eficiente y el uso puede reducir la cantidad de construcción, reparación, mantenimiento y las actividades de desmontaje. Los nanofluidos se pueden emplear en una gran variedad de industrias, desde generación hasta transportación de energía (Saidur, et al., 2011).

Algunas aplicaciones específicas de nanofluidos son:

- Enfriamiento de electrónica.
- Refrigeración (refrigerador doméstico, refrigeradores industriales).
- Aplicaciones automotrices.
- Aplicaciones biomédicas.
- Refrigeración de motores.
- Transferencia de calor.
- Lubricación.
- Aplicaciones tribológicas.
- Procesos químicos.
- Aplicaciones farmacéuticas.

1.4.4.1 Aplicaciones automotrices

La industria automotriz desea obtener una mejor eficiencia energética, para tal motivo se busca motores que consuman menos combustible y tengan un alto rendimiento. Por lo cual, se utilizan nanofluidos que funcionen como líquido de frenos, refrigerantes y en el combustible se puede disminuir el peso y tamaño de los componentes del vehículo (motor y radiador) sin afectar su rendimiento (Cueva & Nole, 2016).

1.4.4.2 Aplicaciones biomédicas

Entre las aplicaciones de los nanofluidos utilizados en la biomedicina tenemos: la nano-cirugía, sensor e imagen, nano-droga, la crio-conservación y en terapias para el cáncer (Andrango, et al., 2013).

1.4.4.3 Aplicaciones en transferencia de calor

Los fluidos (aceites, propilenglicol, etilenglicol, agua) que son utilizados para la transferencia de calor presentan muchos inconvenientes, entre los cuales se destaca su bajo rendimiento en la conductividad térmica, lo que ocasiona un bajo desempeño en los equipos de transferencia de calor (Li & Peterson, 2010).

Algunas aplicaciones para la transferencia de calor son:

- Extracción de energía geotérmica entre otras fuentes de energía (equipos y maquinas que estén expuesto a elevada fricción, enfriamiento de tubería).
- Refrigeración en equipos de aire acondicionado, refrigeradores, torres de enfriamiento, se emplean nanofluidos de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de titanio.
- Reactores nucleares (acumuladores de partículas contaminantes y nocivas).

1.4.4.4 Aplicaciones electrónicas

Los nanofluidos utilizados en la ciencia electrónica son usados como fluidos a micro escala y para el enfriamiento de microchips (Andrango, et al., 2013).

1.5 Sistemas de Refrigeración

Un sistema de refrigeración se define como un sistema cerrado en el que circula un gas refrigerante en un proceso de compresión, para accionar este sistema se utiliza un motor ya sea eléctrico o de combustión interna o también un generador de vapor. Los sistemas de refrigeración debido a su funcionamiento consumen una elevada energía, por lo cual emiten grandes cantidades de CO₂ a la atmosfera. Ciertos factores que influyen en el consumo de electricidad y la eficiencia de los sistemas de refrigeración están al alcance de nuestras decisiones, otros factores están ligados de acuerdo a la forma de operación del sistema (Ruano Dominguez, 2012, p. 34).

La refrigeración es un proceso térmico en el que se promueve la transferencia de calor entre un sistema y un fluido refrigerante para eliminar el calor y mantener una temperatura baja. Los

sistemas de refrigeración se utilizan para aplicaciones domésticas, comerciales e industriales. Además, se utilizan para la conservación de alimentos, medicamentos, acondicionadores de aire y en la industria del transporte (Hernandez, et al., 2016).

1.5.1 Refrigerantes

Los refrigerantes son aquellos fluidos que son capaces de absorber energía en forma de calor cuando su temperatura disminuye y suministrar calor cuando existe un aumento de temperatura. Las propiedades de los refrigerantes difieren unos de otros, tales como: calor específico, calor latente, puntos de ebullición, densidad entre otros factores que dificultan al refrigerante transferir calor (Ruano Dominguez, 2012).

Se pueden clasificar en cinco grupos:

- Halocarbono: CFC-11 o R-11, CFC-12 o R-12, CFC-113 o R-113, CFC-114 o R-114 y CFC-115 o R-115.
- Hidrocarburos (HC): metano (R-50), etano (R-170), propano (R-290), n-butano (R-600) e isobutano (R-600a).
- Compuestos inorgánicos: amoníaco (R-717), agua (H₂O), aire (R-729), dióxido de carbono (R-744) y dióxido de azufre (SO₂).
- Mezclas azeotrópicas: R-502, R-500, R-503 y R-504
- Mezclas Zeotrópicas: R-401A y R-401B.

Varios autores han estudiado e identificado los parámetros óptimos para el rendimiento óptimo del ciclo de refrigeración por compresión. Ningún fluido es ideal en todos los aspectos; cada refrigerante puede tener propiedades negativas tales como toxicidad, inestabilidad química, inflamabilidad, altas presiones de operación o malas propiedades termodinámicas. Actualmente, el fluido más utilizado en refrigeración y aires acondicionados está limitado a los refrigerantes HFC R134a, R32, R125, R143a y mezclas de estos, así como algunos hidrocarburos (propano e isobutano), amoníaco y dióxido de carbono.

Se han realizado muchos estudios sobre el impacto de los refrigerantes en el deterioro de la capa de ozono y el calentamiento global. Los esfuerzos se han centrado en encontrar un fluido alternativo como un sustituto ideal. Sin embargo, la probabilidad de encontrar un refrigerante ideal es prácticamente cero, debido a la cantidad de factores que intervienen en el rendimiento de los sistemas de refrigeración.

1.5.2 Propiedades termodinámicas de los refrigerantes

Se definen como las propiedades que están relacionadas con el movimiento del calor. Las propiedades termodinámicas para cada refrigerante se publican en forma de tablas, las cuales son elaboradas por los propios fabricantes de los refrigerantes y algunas asociaciones relacionadas con refrigeración, las podemos encontrar en manuales, libros de texto o fichas de datos.

1.5.2.1 Temperatura

Existen tres temperaturas que son de suma importancia para un refrigerante y tienen que ser consideradas para el criterio de selección, las cuales son: la temperatura crítica, la de ebullición y la de congelación. La temperatura crítica debe estar por arriba de la temperatura de condensación, también la temperatura de congelación debe estar por debajo de la temperatura del evaporador y por último la temperatura de ebullición debe ser baja.

1.5.2.2 Presión

En un sistema de refrigeración es de suma importancia las presiones. Como primer requisito, se debe operar con presiones positivas; es decir, las presiones en el condensador al igual que en el evaporador tienen que ser superiores a la presión atmosférica. En caso de que en el evaporador la presión sea negativa o se trabaje en vacío, existe el riesgo de que entre aire al sistema debido a una fuga. Por esto, es importante que el refrigerante tenga una presión de evaporación lo más baja posible, pero ligeramente superior a la presión atmosférica.

1.5.2.3 Densidad

La densidad se la define como la masa por unidad de volumen. La variación de la densidad de los líquidos y sólidos con la presión es insignificante, mientras que en la mayoría de gases la densidad es proporcional a la presión e indirectamente proporcional a la temperatura (Cengel & Boles, 2015, p. 13).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (9)$$

Donde:

$\rho = \text{Densidad [kg/m}^3\text{]}$

$m = \text{Masa [Kg]}$

$V = \text{Volumen [m}^3\text{]}$

En su mayoría los refrigerantes en estado líquido, tienen una densidad más alta en comparación del agua, la densidad de cada refrigerante varía inversamente con la temperatura, es decir, su densidad a bajas temperaturas es mayor en cambio a altas temperaturas es menor.

1.5.3 Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas de los refrigerantes, no determinan directamente el calor que puede remover o absorber un refrigerante.

Podemos enumerar las siguientes propiedades tanto físicas como químicas que debe tener un refrigerante:

- No debe reaccionar con la humedad.
- No debe ser tóxico ni venenoso.
- Debe ser un compuesto estable.
- No debe ser explosivo ni inflamable.
- Fácil de detectar cuando se fuga.
- No debe tener efecto sobre otros materiales.
- Debe ser miscible con el aceite.

Podemos decir que ninguno de los refrigerantes conocidos cumple con todas las propiedades mencionadas anteriormente por lo que hasta hoy no se ha obtenido un refrigerante “ideal” (Ruano Dominguez, 2012).

1.5.4 Variables del proceso de refrigeración

1.5.4.1 Caudal

El caudal o flujo volumétrico se describe como el volumen de un fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

$$Q = A * v \quad (10)$$

Donde:

$Q = \text{Caudal o Flujo volumetrico } [m^3/s], [ft^3/s]$

$A = \text{Area de la sección } [m^2], [ft^2]$

$v = \text{velocidad promedio del flujo } [m/s], [ft/s]$

El volumen de un fluido se relaciona con su masa mediante la densidad por lo que se puede pasar de flujo volumétrico a flujo másico, este tipo de flujo es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

$$\dot{m} = Q * \rho \quad (11)$$

Donde:

\dot{m} = Gasto másico [kg/s]

Q = Caudal [m^3/s]

ρ = Densidad del líquido [kg/m^3]

1.5.4.2 Temperatura

Es una propiedad termodinámica que refleja la cantidad de calor que poseen los cuerpos, la temperatura es una propiedad intensiva por que no depende de la masa (Guaman & Muñoz, 2017).

La temperatura es considerada como una medida que cuantifica las sensaciones de frío y calor (Muller, 2002, pp. 121-124).

1.5.5 Calor

El calor es una energía en transición desde un sistema o cuerpo a otro, debido solo a la diferencia de temperatura entre los sistemas (Faires & Simmang, 1983).

El calor es una forma de energía y según la segunda ley de la termodinámica el calor es una energía que fluye de un cuerpo caliente a un frío (Cengel, 2007), esto induce a que debe existir un gradiente de temperatura entre dos medios para que exista una transferencia de calor, en el instante en que los cuerpos lleguen a tener la misma temperatura se llegara a un equilibrio térmico en el cual se detiene la transferencia de calor por lo que conoce al calor como una energía de tránsito. La transferencia de calor se la realiza en forma de calor latente y calor sensible (Guaman & Muñoz, 2017).

1.5.5.1 Calor Latente

Es la energía necesaria para que una sustancia cambie de fase, este tipo de energía en forma de calor no sufre variación de temperatura (Guaman & Muñoz, 2017, p. 7).

1.5.5.2 Calor sensible

Este tipo de calor es lo contrario al calor latente, por lo tanto se define como el calor requerido para incrementar la temperatura de una sustancia sin que ocurra un cambio de fase (Guaman & Muñoz, 2017).

1.5.6 Curvas de enfriamientos

Para poder comprender de mejor manera el comportamiento de los fluidos secundarios (anticongelantes) se utilizan curvas de enfriamiento empleando los siguientes parámetros: temperatura, tiempo, caudal y etapa de enfriamiento. En un mismo fluido con diferentes concentraciones se puede obtener las curvas de enfriamiento para poder analizar el efecto que produce la concentración de una solución en el proceso de refrigeración (Guaman & Muñoz, 2017). En esta investigación analizaremos dos tipos de curvas:

1.5.6.1 Curva caudal vs tiempo

Este tipo de curva permite analizar la influencia que poseen las propiedades de los fluidos como la viscosidad y la densidad al disminuir su temperatura, respecto a la disminución del caudal que sufre el fluido (Guaman & Muñoz, 2017).

1.5.6.2 Curva temperatura vs tiempo

Esta curva permite observar la disminución de temperatura en función del tiempo, también se puede ver que la mezcla alcanza una temperatura mínima, la misma que no sufre cambios significativos y la transferencia de calor disminuye (Guaman & Muñoz, 2017).

1.6 Equipo de refrigeración chiller

Este equipo tiene como función principal enfriar el agua o fluido del sistema (Ribeiro Salazar, 2016). El termino chiller proviene de la palabra inglesa “chill” que significa helar, un chiller es un enfriador industrial de agua, salmuera o anticongelante el cual es usado en procesos de enfriamiento posteriores. La función principal es extraer el calor generado en un proceso determinado por medio del contacto con el fluido frio, la cual retorna al chiller para disminuir su temperatura y ser envía nuevamente al proceso (Valenzuela, 2010).

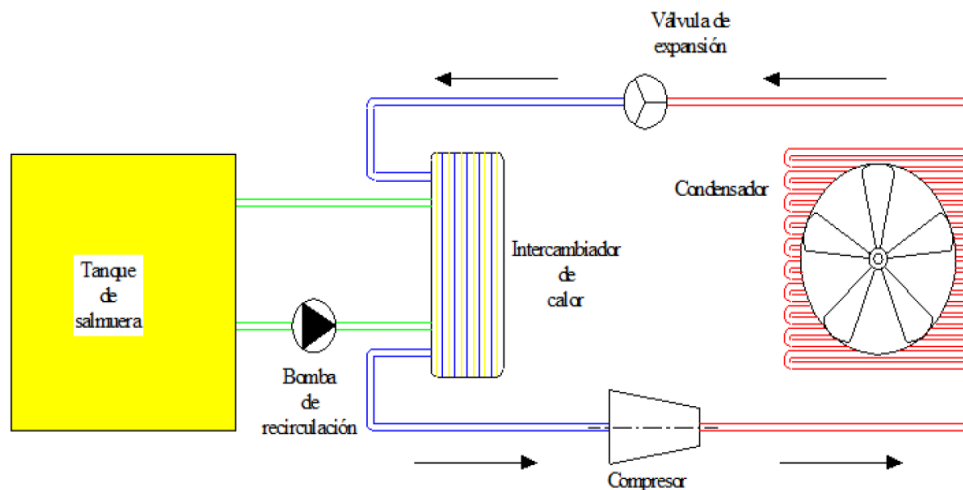


Figura 12-1: Elementos del Equipo Chiller.

Fuente: (Macas Sarabia & Toainga Molina, 2015, p. 13).

Como se ilustra en la figura 12-1, los principales componentes del equipo chiller son: evaporador, compresor, condensador, válvula de expansión y la bomba que se encarga de impulsar el líquido enfriado por el sistema de refrigeración. Seguidamente, se describen los elementos del equipo chiller, el cual pertenece al Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, adicionalmente este equipo cuenta con un sistema de adquisición de datos para la facilitación de toma y análisis de datos en el transcurso de las pruebas experimentales (Guaman & Muñoz, 2017).

1.6.1 Sistema de adquisición de datos

Los componentes que forman este sistema son: la tarjeta NI-cDAQ y dos sensores para poder obtener los datos de caudal y temperatura, la programación realizada en el software LabView, en el que se almacena datos de caudal y temperatura del fluido en tiempo real en una tabla de Excel durante un intervalo de 5 minutos hasta finalizar la prueba (Guaman & Muñoz, 2017).

1.6.1.1 Sensor de caudal

Para medir el caudal se utiliza un sensor tipo paletas el cual se encuentra instalado en el equipo chiller. Su rango de funcionamiento es de 0,3 a 6 m/s, en cuanto al número de Reynolds debe ser 4500 como mínimo (Guaman & Muñoz, 2017).

Para una eficiente toma de datos es necesario verificar que la ubicación y disposición del sensor se encuentre como lo indica el fabricante, con la finalidad de que se desarrolle completamente el perfil de velocidades y, que el instrumento realice la correcta medición se debe considerar la distancia de accesorios antes y después del sensor.

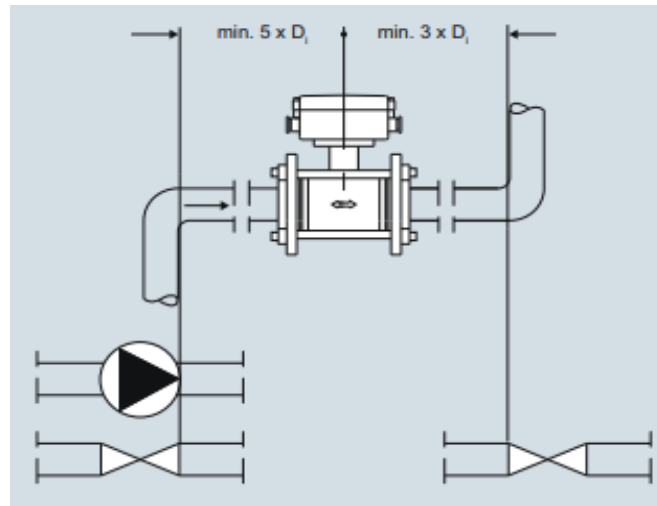


Figura 13-1: Ubicación del Caudalímetro.

Fuente: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10020787/#10020787/info/>

En la figura 14-1 se muestra como se debe colocar el sensor de caudal con el fin de evitar acumulación de aire en la tubería, problemas de desgaste en el rotor y efectos desfavorables por sedimentaciones (Guaman & Muñoz, 2017).

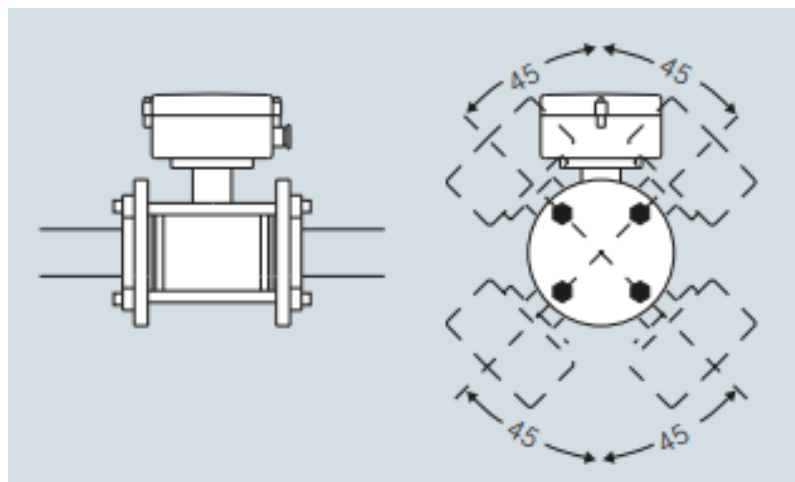


Figura 14-1: Colocación del sensor de caudal.

Fuente: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10020787/#10020787/info/>

1.6.1.2 Sensor de Temperatura

Este tipo de sensor tiene como función medir la temperatura a la que se encuentra la mezcla del tanque de almacenamiento por medio de un termistor NTC (Guaman & Muñoz, 2017).

1.7 Anticongelantes utilizados en equipos chiller

Los anticongelantes se definen como una mezcla de sustancias químicas, las cuales son capaces de disminuir el punto de congelación del agua por debajo de los 0°C. Para proteger el circuito de refrigeración los anticongelantes tienen que cumplir con los siguientes requerimientos: su efecto corrosivo debe ser el mínimo para no causar daños en el circuito y mantener sus propiedades con el paso del tiempo (Gago & Román Chambergo, 2017).

La utilización de un refrigerante secundario o anticongelante resulta ser más económico para grandes plantas de refrigeración, cuando necesiten bombear a lugares lejanos. A la mezcla de soluto y agua a diferentes concentraciones se la conoce como solución acuosa, el soluto tiene como base compuestos orgánicos e inorgánicos que poseen propiedades de los anticongelantes, entre los refrigerantes secundarios o anticongelantes que están compuestos con base alcohol o glicol son los de origen orgánico, mientras que los de origen inorgánico están compuestos con base cloruro (Guaman & Muñoz, 2017).

1.7.1 Anticongelantes con base cloruro

El cloruro de calcio y cloruro de sodio son los refrigerantes secundarios con base cloruro mayormente empleados. A la mezcla de cloruro de calcio o sodio con agua se la conoce como salmuera, actualmente estos anticongelantes son los de menor costo (Guaman & Muñoz, 2017).

Cloruro de calcio. - Esta salmuera se utiliza por su bajo punto de ebullición y su alto calor específico propiedades que hacen que su implementación sea de bajo costo. El cloruro de calcio circula por las tuberías que llevan a un evaporador donde se enfría el refrigerante secundario al entrar en contacto con el refrigerante primario que circula por la unidad condensadora (Almendariz & Lara Gavilanez, 2014, p. 45).

Cloruro de sodio.- Este tipo de anticongelante tiene buenas propiedades termodinámicas y baja toxicidad por lo que se puede utilizar en la industria alimenticia, su principal desventaja es que tiene un alto nivel de corrosión además de que su punto de congelación es superior a los demás refrigerantes secundarios (Guaman & Muñoz, 2017, p. 24).

1.7.2 Anticongelantes con base alcohol

El etanol y metanol en estado puro o en soluciones acuosas son usados como anticongelantes para obtener una temperatura de congelación de acuerdo a los requerimientos que se necesite. Su desventaja radica en que son corrosivos e inflamables (Guaman & Muñoz, 2017, pp. 25-26).

Etanol.- El etanol es utilizado en la elaboración de bebidas que contienen alcohol y en la industria farmacéutica debido a que no es toxico (Guaman & Muñoz, 2017), sus propiedades térmicas en comparación con las del metanol son menos favorables, pero si son inflamables por lo que su uso está restringido a plantas e industrias en las que se cuente con un sistema de seguridad contra incendios (Carrier Air Conditioning Company, 1980, p. 389).

Metanol. - Es un refrigerante secundario utilizado ampliamente en las industrias farmacéutica y química, en algunas aplicaciones no es muy recomendable utilizarlo debido a su alto grado de toxicidad, tiene un bajo punto de fusión y capacidad calorífica. La concentración de metanol tiende a reducirse con el tiempo debido a su mayor tendencia a evaporarse respecto al agua con la que es mezclado.

1.7.3 Anticongelantes con base glicol

Etilenglicol. - Es un líquido incoloro, inodoro y no volátil, tiene un amplio uso industrial, se emplea en el sistema de enfriamiento de vehículos automotores compuesto básicamente de etilenglicol y diferentes inhibidores de corrosión en forma concentrada, además de su uso tradicional como disolvente y típicamente como anticongelante. La producción de etilenglicol es a partir de etileno, mediante el compuesto intermedio óxido de etileno. El óxido de etileno reacciona con agua produciendo el etilenglicol, dicha reacción puede ser catalizada mediante ácidos o bases. La mayor producción de etilenglicol se obtiene con un pH ácido o neutro en presencia de abundante agua (García Aguilar, 2013).

Propilenglicol. - Es un fluido soluble utilizado ampliamente en el campo farmacéutico como vehículo para el suministro de fármacos con baja solubilidad en agua, estabilizante para las vitaminas, debido a su poca toxicidad ya sea en el suministro oral o por vía intravenosa. Debido a su amplia posibilidad de empleo y su seguridad de consumo, lo han hecho contar entre los aditivos admitidos y considerados seguros por la FDA y ha sido incluido por la FAO en la lista de los aditivos alimentarios en 1963.

1.8 Propilenglicol

El propilenglicol es considerado el mejor constituyente de líquidos de deshielo de barcos, carros y aviones debido a las propiedades atractivas que posee como humectante, solvente y su reducida toxicidad ha permitido la utilización en una gran variedad de productos comerciales e industriales (Guaman & Muñoz, 2017).

1.8.1 Aplicaciones de propilenglicol

Existe una gran variedad de aplicaciones del propilenglicol, las cuales se muestran a continuación:

- Industria alimenticia.
- Industria farmacéutica.
- Anticongelante o refrigerante secundario.
- Fluidos Hidráulicos.
- Plastificantes.
- Disolventes.
- Cosméticos y productos de cuidado personal.
- Sabores y fragancias.
- Intermediarios químicos.

1.8.2 Propiedades fisico-químicas

- Formula química: $C_3H_8O_2$
- Punto de fusión: $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Punto de ebullición: $182,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Masa molecular: $76,09\text{ g/mol}$
- Conductividad térmica: $0,34\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{K}$
- pH (50% solución): 6,5-7,5
- Presión de vapor (20°C): $0,07\text{ mmHg}$
- Punto de inflamación: 103°C
- Densidad (20°C): $1,036\text{ g/cm}^3$
- Densidad de vapor: 2,62 (aire=1)
- Viscosidad (20°C): $55\text{ mPa}\cdot\text{s}$
- Aspecto: Líquido viscoso incoloro
- Olor: prácticamente inoloro
- Solubilidad en agua: Completa

Se debe tener presente que al aumentar el porcentaje de propilenglicol en la solución (González Besa, 2014, p. 31):

- Aumenta la densidad de la solución.
- Disminuye la temperatura congelación.
- Aumenta la viscosidad de la solución, en consecuencia, se requiere mayor energía de bombeo.
- Disminuye el calor específico.

1.8.3 Ventajas del uso de propilenglicol

Entre las ventajas que se tiene al utilizar el propilenglicol tenemos: solubilidad, punto de congelación, presión de vapor y punto de ebullición.

1.8.3.1 Solubilidad

El propilenglicol tiene una solubilidad completa con el agua, además es un disolvente de aceites y productos químicos orgánicos (González Besa, 2014).

1.8.3.2 Punto de congelación

Permite que la solución tenga un punto de congelación por debajo de agua, puesto que a condiciones normales en vez de congelarse se establecen en sólidos como el cristal (González Besa, 2014).

1.8.3.3 Presión de vapor y punto de ebullición

El propilenglicol tiene una presión de vapor más baja en comparación del agua y su punto de ebullición es mayor que la del agua. Esta poca volatilidad disminuye su tendencia a evaporarse, razón por la cual se usa como anticongelante (González Besa, 2014).

1.8.4 Desventajas del uso de propilenglicol

El uso de propilenglicol también presenta algunos inconvenientes como: corrosión, costo, durabilidad y transferencia de calor.

1.8.4.1 Corrosión

Para evitar problemas de corrosión en el sistema de refrigeración se debe realizar la limpieza de los equipos e instalaciones con una solución de pH neutro. Se debe evitar utilizar materiales como: el aluminio y zinc para los sistemas de refrigeración (González Besa, 2014, p. 38).

1.8.4.2 Costo

El propilenglicol tiene un costo de adquisición considerable, además se incrementa el consumo de energía de la bomba.

1.8.4.3 Durabilidad

Las propiedades del propilenglicol disminuyen con paso del tiempo y su propiedad de anticongelante disminuye, por lo que es necesario sustituirlo cada cierto tiempo (González Besa, 2014).

1.8.4.4 Transferencia de calor

El inconveniente principal del uso de propilenglicol es la disminución de la transferencia de calor, debido a que los parámetros de los que depende la transmisión de calor son (González Besa, 2014):

- Densidad del fluido (Ver anexo A).
- Viscosidad del fluido (Ver anexo B).
- Calor específico del fluido (Ver anexo C).
- Conductividad térmica (Ver anexo D).

1.8.5 Nanopartículas suspendidas en propilenglicol

En un estudio realizado por (Márquez, et al., 2017) se utilizó el propilenglicol como surfactante para modificar las características morfológicas y respuesta eléctrica al gas propano de las nanopartículas de óxido de hierro III. Los resultados mostraron que la adición del surfactante propilenglicol ayudó a que las películas de óxido de hierro fuesen más delgadas, por lo que el agrietamiento disminuye considerablemente o llegó a ser casi nula.

Se dispersaron nanopartículas de ZnO en soluciones al 10% de concentración de propilenglicol, se midió la densidad viscosidad y la velocidad ultrasónica de estos nanofluidos a diferentes temperaturas. Estas propiedades aumentaron cuando se añadieron nanopartículas de ZnO hasta 0,04% en peso debido a que las interacciones moleculares aumentan disminuyendo las aglomeraciones, mientras que a una concentración del 0,08% de nanopartículas de ZnO sus propiedades disminuyeron (Kumar, et al., 2017).

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe: equipos, materiales, reactivos químicos, método de obtención de nanopartículas de alofán, concentraciones de: nanopartículas de alofán y del anticongelante propilenglicol utilizados para la formación del nano refrigerante.

2.1 Materiales y Equipos

Los reactivos, compuestos, equipos y materiales utilizados tanto para la elaboración de las nanopartículas de alofán como para el nanofluido, así también del equipo de refrigeración utilizado para las pruebas correspondientes; las cuales se detallan a continuación:

Tabla 1-2: Reactivos y Compuestos.




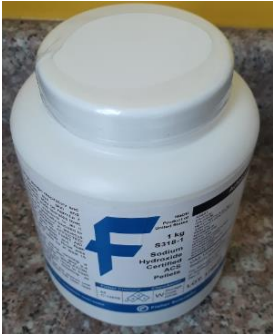


Reactivos y Compuestos químicos	Ilustración	Propiedades
1. Agua Destilada		<ul style="list-style-type: none">▪ Fórmula: H_2O▪ Densidad: 1 g/cm^3▪ Masa Molar: 18 g/mol
2. Nitrato de Aluminio Nonahidratado		<ul style="list-style-type: none">▪ Fórmula: $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$▪ Densidad: $1,72\text{ g/cm}^3$▪ Masa Molar: $375,13\text{ g/mol}$

Tabla 1-2(Continúa): Reactivos y Compuestos.

3. Silicato de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fórmula: Na_2SiO_3 ▪ Densidad: $1,35 g/cm^3$ ($20^\circ C$) ▪ Masa Molar: $122,06 g/mol$
4. Hidróxido de Sodio		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fórmula: NaOH ▪ Densidad: $2,1 g/cm^3$ ▪ Masa Molar: $33,99 g/mol$
5. Nanopartículas de Alofán		<ul style="list-style-type: none"> • Fórmula: $1 - 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 5 - 9H_2O$ ▪ Suspendidas en Agua destilada.
6. Propilenglicol		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fórmula: $C_3H_8O_2$ ▪ Densidad: $1,036 g/cm^3$ ▪ Masa Molar: $76,09 g/mol$ ▪ Solubilidad en agua: Completa.

Realizado por: Autores.

Tabla 2-2: Equipos utilizados en los laboratorios.





Equipo	Ilustración	Características
1. Agitador Magnético		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: SONICA Sweep System ▪ Modelo: 500 WATT MODEL ▪ Rango temperatura: 5-40°C. ▪ Humedad relativa: 20-90% sin condensación.
2. PH metro		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: BOECO ▪ Modelo: BT-675 ▪ Rango de PH: 0 a 14 ▪ Rango temperatura: 0 a +100 °C ▪ Punto Neutro: PH 7 ▪ Tiempo de respuesta: < 1 sec.
3. Balanza analítica		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: OHAUS Corporation. ▪ Modelo: EX224 ▪ Capacidad máxima: 220 g. ▪ Precisión: 0,0001 g. ▪ T. Recomendada: 21,9 °C.
4. Centrifuga		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: ORTO alresa ▪ Modelo: DIGTOR 21 C 110V ▪ Rotor capacidad máx.: 4 x 100 ml ▪ Velocidad rotación máx.: 3000 rpm.

Tabla 2-2 (Continúa): Equipos utilizados en los laboratorios.

5. Estufa		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: MEMMERT ▪ Modelo: SyngleDISPLAY ▪ Temperatura hasta a 180 °C ▪ Sensor Pt100, panel control de fácil manejo.
6. Sonificador Ultrasónico		<ul style="list-style-type: none"> • Marca: SOLTEC ▪ Modelo: SONICA 3200L ETH. ▪ Capacidad: 6 litros. ▪ Temperatura máxima: 60°C
7. Espectrómetro de infrarrojo		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: Jasco ▪ Modelo: FT/IR-4100 ▪ Rango espectral de onda: 7800-350 [cm-1].
8. Liofilizador.		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidad de la cámara: 5 Kg. ▪ Eficiencia de la bomba al vacío: 84,5%. ▪ Temperatura de congelación: -0,9°C ▪ Presión manométrica: -0,65 psi. ▪ Voltaje de la bomba y el motor: 110V.

Tabla 2-2 (Continúa): Equipos utilizados en los laboratorios.

<p>9. Microscopio electrónico de barrido (SEM)</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marca: Jeol SEM. ▪ Modelo: JSM-IT100. ▪ Resolución: 3nm(30kv), 4nm(20kv), 15nm(1kv) ▪ Aumento: x5 a x300,000 ▪ Tamaño de imagen: (128x96)mm.
<p>10. Chiller</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidad del tanque: 218 litros. ▪ Refrigerante primario: R404a. ▪ Potencia bomba: 1Hp.

Realizado por: Autores.

Tabla 3-2: Materiales.





Nombre	Ilustración
1. Dos vasos de precipitación de 250ml.	
2. Dos vasos de precipitación de 100ml.	
3. Pipeta de 10ml.	
4. Pera de succión.	

Tabla 3-2 (Continúa): Materiales.











5. Magneto	
6. Píseta	
7. Espátula con cuchara	
8. Varilla de agitación	
9. Probeta de 100 y 500ml.	

Tabla 3-2 (Continúa): Materiales.

<p>10. Dos balones aforados de 100ml</p>	
<p>11. Tres vasos de plástico de 250ml.</p>	
<p>12. Tubos de plástico de 45ml.</p>	
<p>13. Pinza de crisol.</p>	
<p>14. Recipiente de plástico de 1000ml.</p>	

Realizado por: Autores.

2.2 Verificación del funcionamiento adecuado del chiller

Para un correcto funcionamiento del equipo chiller es necesario que se realice el respectivo mantenimiento el cual consiste en realizar: limpieza, lubricación, cambio de piezas y accesorios vulnerables o desgastados tomando en cuenta las respectivas normas de seguridad con el fin de reducir posibles fallas al momento de realizar las pruebas.

Se realizó un mantenimiento preventivo al equipo chiller para asegurar su correcto funcionamiento.

2.2.1 *Mantenimiento preventivo al equipo chiller.*

El plan de mantenimiento preventivo consiste en realizar inspecciones del entorno donde está ubicado el equipo chiller, así como también detectar posibles daños o averías ocasionados por corrosión, desgaste de pintura e impactos físicos en los componentes que conforman el equipo chiller. Los parámetros que se tuvo en cuenta son:

- Presencia de polvo.
- Humedad.
- Temperatura.
- Vibraciones.

El procedimiento que se realizó para el mantenimiento fue el siguiente:

1. Verificación del funcionamiento del equipo chiller.



Figura 1-2: Equipo Chiller.

Realizado por: Autores.

2. Revisión del estado de los componentes mecánicos, desgaste de accesorios, fugas, lubricación.



Figura 2-2: Estado inicial de las tuberías.

Realizado por: Autores.

3. Revisión de las instalaciones eléctricas, se verifico que los sensores y demás componentes se encuentren en buen estado y haya continuidad en los cables para que los datos transferidos a la tarjeta de adquisición de datos sea la correcta.

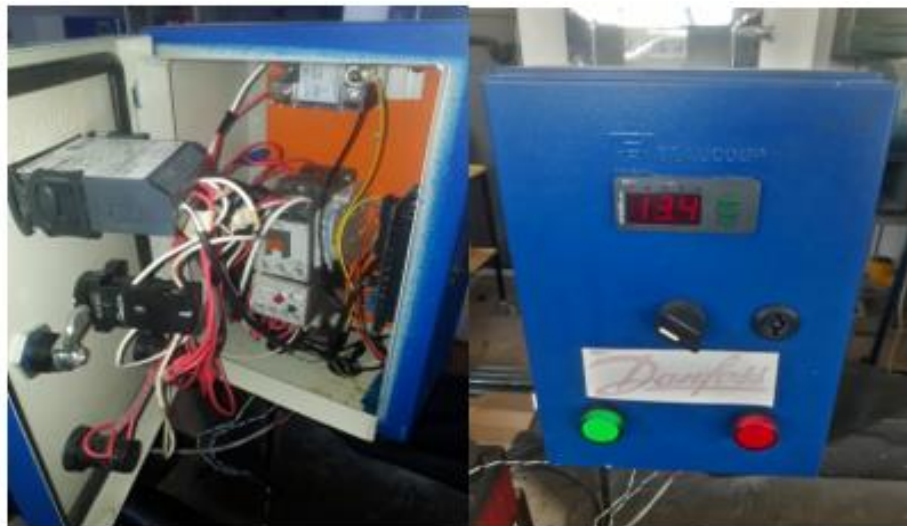


Figura 3-2: Verificación del tablero de control del chiller.

Realizado por: Autores.

4. El equipo chiller estuvo un largo tiempo sin ser utilizado y no se le dio un mantenimiento continuo, esto ocasiono que varios componentes se desgastaran. Uno de los componentes principales que sufrió un deterioro fue el tanque de almacenamiento; se detectaron fugas, oxidación y desgaste de pintura. El mantenimiento que se realizó fue: hermetización del tanque, pulido de las partes oxidadas y pintado de las partes externas.



Figura 4-2: Limpieza y pintado del tanque de almacenamiento.

Realizado por: Autores

5. Debido al deterioro del aislamiento de las tuberías se procedió a remplazarlas para tener una mejor transferencia de calor.



Figura 5-2: Reemplazo de tuberías y aislamientos.

Realizado por: Autores

6. Al revisar el sistema de bombeo se llegó a la conclusión de que la bomba de agua tenía fugas y pérdidas por lo que se procedió a cambiarla por una nueva bomba.



Figura 6-2: Cambio de la bomba del equipo chiller

Realizado por: Autores

7. Se verificó el nivel de refrigerante y se calibraron las presiones de alta y de baja para que el equipo chiller funcione adecuadamente.



Figura 7-2: Calibración de presiones del compresor

Realizado por: Autores.

8. Se realizó el cambio del temporizador, que es el encargado de abrir y cerrar el circuito de manera automática, debido a que este componente dejó de funcionar.

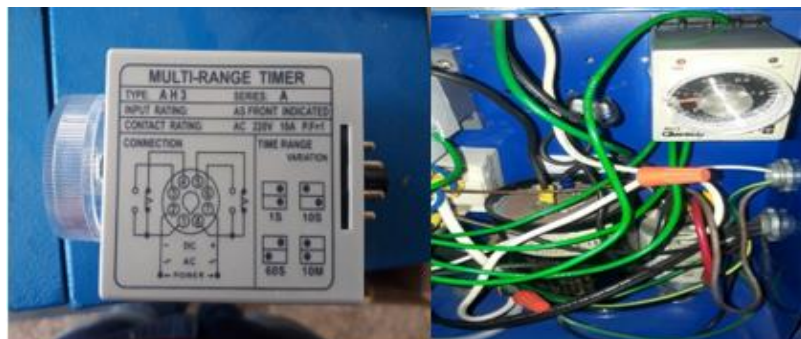


Figura 8-2: Reemplazo del temporizador.

Realizado por: Autores

2.3 Método de síntesis de nanoparticulas.

Para la síntesis de la nanopartícula alofán se utilizó el método químico de co-precipitación debido a que durante el proceso de síntesis su homogeneidad es alta en comparación de otros métodos, además este método se lo puede realizar en equipos de fácil adquisición y no necesita temperaturas elevadas (Muñoz, et al., 2007).

2.3.1 Nanoparticulas de alofán.

La síntesis de las nanoparticulas de alofán realizado por el método de co-precipitación, consiste en agregar simultáneamente soluciones de hidróxido de sodio ($NaOH$) y nitrato de aluminio nona-hidratado ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) en una solución de silicato de sodio (Na_2SiO_3), manteniendo una velocidad de agitación constante y un pH aproximado de 5. En la tabla 5-2 se detalla los parámetros utilizados en este proceso:

Tabla 4-2: Parámetros utilizados en la sintetización de alofán.

Parámetro	Descripción	Unidad
Cantidad total de hidróxido de sodio.	320	gramo
Cantidad total de nitrato de aluminio nona-hidratado.	1000	gramo
Cantidad total de silicato de sodio.	710	mililitros
Agitación	400	rpm
Tiempo	45-60	min

Realizado por: Autores.

El procedimiento utilizado para la síntesis de nanoparticulas de alofán fue el siguiente:

1. Se pesaron 33,76 g de nitrato de aluminio nona-hidratado y 8g de hidróxido de sodio.



Figura 9-2: Pesaje del nitrato de aluminio e hidróxido de sodio.

Realizado por: Autores.

2. Se midió 17,75 ml de silicato de sodio.



Figura 10-2: Medición del volumen del silicato.

Realizado por: Autores

3. Se disolvió en agua destilada cada uno de los reactivos químicos anteriormente mencionados en soluciones de 100ml.



Figura 11-2: Soluciones de Na_2SiO_3 y NaOH

Realizado por: Autores.

4. Se agregó 200ml de agua destilada en un recipiente de plástico de 1000ml, el cual se colocó sobre el equipo de agitación para luego ponerlo en funcionamiento.

5. Posteriormente se añadió 100ml de silicato de sodio en el recipiente y hasta obtener un pH cercano al valor de 12.



Figura 12-2: Añadir Silicato de Sodio hasta tener un pH de 12.

Realizado por: Autores

6. Se añadió simultáneamente 74,1ml de nitrato de aluminio nona-hidratado y 65ml de hidróxido de sodio hasta obtener un pH aproximado de 5.



Figura 13-2: Mezcla de los químicos.

Realizado por: Autores

7. Se dejó agitando la mezcla durante un intervalo de 45 a 60 minutos y a una velocidad de 400 rpm.



Figura 14-2: Proceso de agitación.

Realizado por: Autores.

8. La mezcla obtenida se la coloco en tubos de plástico de 45ml para realizar el proceso de centrifugado durante 15 min a una velocidad de 3000rpm, este proceso permite separar el cloruro de sodio del alofán sintético presente en la mezcla.

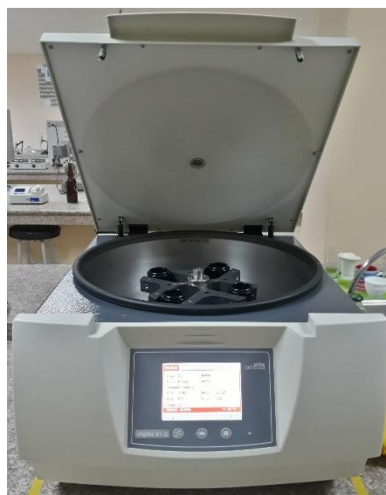


Figura 15-2: Centrifugación.

Realizado por: Autores

9. A continuación, se realizó el proceso de lavado que consiste en eliminar el cloruro de sodio, luego se completó con agua destilada el volumen eliminado anteriormente.



Figura 16-2: Suspensión concentrada de alofán .

Realizado por: Autores

10. Se mezcló nuevamente en un vaso de precipitación de 250ml y se dejó en el equipo Sonificador ultrasónico durante 10min hasta obtener una mezcla homogénea.



Figura 17-2: Proceso de lavado y sonificación.

Realizado por: Autores.

11. El proceso de centrifugado y lavado se lo volvió hacer dos veces más para eliminar todo el cloruro de sodio posible (repetir del paso 8-10).

12. Se obtuvo las nanopartículas de alofán, las cuales se las mantuvieron en suspensión para los estudios posteriores; luego se tomó un determinado volumen para congelarlo y liofilizarlo, esto nos sirvió para realizar la caracterización del material.



Figura 18-2: Obtención del alofán .

Realizador por: Autores.

13. También se realizó el proceso de secado de unas pequeñas muestras tomadas del volumen total obtenido, para determinar la concentración de nanopartículas que se encuentran suspendidas en la solución. Este proceso se lo hizo en la estufa durante 1 hora y a una temperatura de 105°C.



Figura 19-2: Muestras de la mezcla secadas.

Realizado por: Autores

2.4 Determinación de concentraciones.

Para la elaboración del nanorefrigerante se requiere conocer las cantidades de propilenglicol, agua y nanopartículas de alofán lo que se explica a continuación:

Según estudios realizados en un trabajo anterior utilizando propilenglicol se determinó que las concentraciones adecuadas para este refrigerante secundario son: 15% y 21% en volumen de propilenglicol; debido a que con estas concentraciones el equipo chiller trabajo en condiciones normales sin presentar ninguna anomalía en su funcionamiento, llegando a obtener una temperatura de -4°C y -7°C respectivamente.

En el grafico 1-2 se muestran las temperaturas de congelación de la solución a concentraciones de 15% y 21% de propilenglicol.

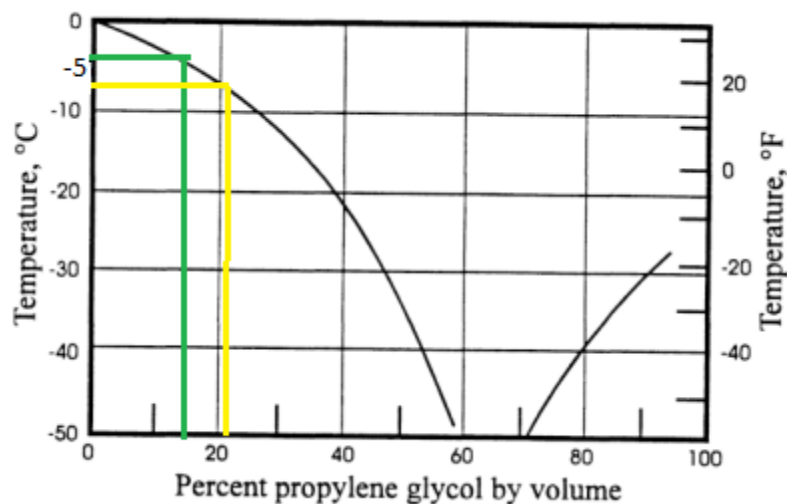


Gráfico 1-2: Temperatura de congelación de la solución del propilenglicol.

Realizado por: (Stoecker, 1998, p. 661)

La concentración de nanopartículas recomendada en nano refrigerante está en un rango de (0,05-5) % en volumen, esto según estudios realizados, también se demostró que la adición de pequeñas cantidades de nanopartículas menor al 1% en volumen aumenta el calor específico del mismo, esta es la razón por la que se decidió realizar las pruebas con una concentración de 0,5% en volumen de nanopartículas de alofán.

2.4.1 Concentración al 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán.

Para determinar la cantidad de propilenglicol, agua y nanofluido que se necesitan para realizar las pruebas se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V/V = \frac{V_{\text{soluto}}}{V_{\text{solucion}}} * 100 \quad (13)$$

$$V_{\text{solucion}} = V_{\text{soluto}} + V_{\text{agua}} \quad (14)$$

Donde:

V/V : concentración en volumen de solución (%)

V_{soluto} : volumen de soluto (propilenglicol o nanofluido) (l)

V_{solucion} : volumen de la solución (l)

V_{agua} : volumen de agua

Las pruebas se realizaron con un volumen de solución de 180 litros y para una concentración de 15%, tenemos un volumen de propilenglicol igual a:

$$V/V = \frac{V_{pg}}{V_{\text{solucion}}} * 100$$

$$V_{pg} = \frac{V/V * V_{\text{solucion}}}{100} = \frac{15 * 180}{100} = 27 \text{ l}$$

El nanofluido tiene un volumen total de 10 litros con una concentración de nanopartículas de alofán al 10%, la ecuación que se necesita para calcular el volumen de nanofluido con un volumen de solución de 180 lt y una concentración de 0,5% es:

$$10 * V/V = \frac{V_{na}}{V_{\text{solucion}}} * 100$$

$$V_{na} = \frac{10 * V/V * V_{\text{solucion}}}{100} = \frac{10 * 0,5 * 180}{100} = 9 \text{ l}$$

$$V_{\text{solucion}} = V_{\text{soluto}} + V_{\text{agua}}$$

$$V_{\text{agua}} = V_{\text{solucion}} - V_{pg} - V_{na}$$

$$V_{\text{agua}} = 180\text{l} - 27\text{l} - 9\text{l} = 144 \text{ l}$$

2.4.2 Concentración al 21% de propilenglicol y 0,5 de alofán.

La concentración de 21% de propilenglicol se obtiene añadiendo una cantidad de volumen adicional de propilenglicol con una concentración de 0,5% de nanopartículas de alofán para no variar la concentración de nanopartículas en la solución, luego se retira una cantidad de solución para conservar el volumen requerido para la prueba, la ecuación que permite calcular el volumen adicional de propilenglicol es la siguiente:

$$V/V = \frac{V_{pg\ o} + V_{pg\ ad}}{V_{solucion} + V_{pg\ ad}} * 100 \quad (15)$$

Donde:

V/V = concentración en volumen de la mezcla [%].

$V_{pg\ o}$ = volumen de propilenglicol inicial [l].

$V_{pg\ ad}$ = volumen de propilenglicol adicional [l].

$V_{solución}$ = volumen de la mezcla [l].

$$V_{pg\ ad} = \frac{V/V * V_{solucion} - 100 * V_{pg\ o}}{100 - V/V}$$

$$V_{pg\ ad} = \frac{21 * 180 - 100 * 27}{100 - 21} = 13,67\ l$$

$$V/V = \frac{V_{na\ ad}}{V_{pg\ ad} + V_{na\ ad}} * 100$$

$$V_{na\ ad} = \frac{V/V * V_{pg\ ad}}{100 - V/V} = \frac{0,5 * 13,67}{100 - 0,5} = 0,0687\ l$$

Se debe adicionar 13,67 litros de propilenglicol y 0,0687 litros de nanofluido para obtener una concentración del 21% de propilenglicol y mantener una concentración de 0,5% de nanopartículas de alofán. Luego de obtener una mezcla homogénea se tiene que quitar la misma cantidad de solución que se agregó.

2.5 Elaboración del nanorefrigerante.

Luego de haber calculado los volúmenes necesarios de propilenglicol, nanofluido y de agua, se precedió a elaborar el nanorefrigerante. La elaboración del nanorefrigerante se la hizo directamente en el tanque reservorio del equipo chiller. A continuación, en las tablas 5-2 y 6-2 se detalla la concentración y volumen de cada fluido utilizados para la formación del nanorefrigerante:

Tabla 5-2: Volúmenes para la elaboración del nanorefrigerante al 15% de propilenglicol.

Nombre	Porcentaje (%)	Cantidad (l)
Propilenglicol	15	27
Nanofluido	5	9
Agua	80	144
Total	100	180

Realizado por: Autores.

Tabla 6-2: Volúmenes para la elaboración del nanorefrigerante al 21% de propilenglicol.

Nombre	Porcentaje (%)	Cantidad (l)
Propilenglicol	21	37,8
Nanofluido	5	9
Agua	74	133,2
Total	100	180

Realizado por: Autores.

2.6 Procedimiento para determinar el calor específico del líquido refrigerante

2.6.1 Determinación de la constante del calorímetro

1. Determinar la masa de 75ml de agua fría y su temperatura, a continuación, vierta el agua en el recipiente del calorímetro.
2. Determinar la masa de 75ml de agua caliente aproximadamente de una temperatura de 70°C y medir su temperatura exacta.
3. Mezclar suavemente las dos sustancias utilizadas durante 3 minutos y determinar la temperatura final.

2.6.2 Determinación del calor específico del líquido refrigerante

1. Determinar la masa de 75ml de agua fría y su temperatura, a continuación, vierta el agua en el recipiente del calorímetro.
2. Determinar la masa de 75ml del líquido refrigerante caliente aproximadamente de una temperatura de 70°C y medir su temperatura exacta.
3. Mezclar suavemente las dos sustancias utilizadas durante 3 minutos y determinar la temperatura final.

CAPÍTULO III

3 EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se obtuvo los resultados de la caracterización del alofán y se realizó la toma de datos como: caudal, temperatura y tiempo de las pruebas experimentales hechas en el equipo de refrigeración chiller a diferentes concentraciones y aperturas de la válvula. Los datos obtenidos se utilizaron para la realización de las curvas de enfriamiento y hacer un análisis comparativo con curvas obtenidas en estudios anteriores. También se determinó la capacidad calorífica del líquido refrigerante.

3.1 Resultados de la Caracterización de nanopartículas de alofán

Se realizó la caracterización de las nanopartículas de alofán mediante el método de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de infrarrojo (IR), los cuales permitieron conocer la estructura, composición y tamaño.

3.1.1 Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para poder realizar la caracterización por este método se tuvo que tomar muestras de las nanopartículas de alofán liofilizadas y se hicieron análisis en el microscopio electrónico de barrido obteniendo los resultados que se muestran a continuación:

Como se puede observar en la figura 1-3, se midió el tamaño de las nanopartículas a una ampliación de X140,000 obteniendo partículas de tamaño nanométrico, así como de tamaño micrométrico esto debido a las aglomeraciones presentes en la muestra.

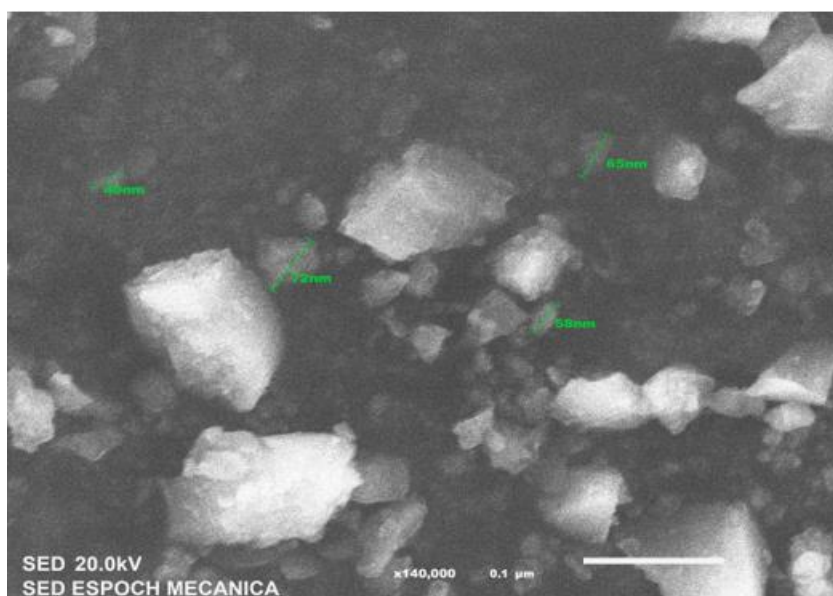


Figura 1-3: Tamaño de nanopartículas de alofán sintético.

Realizado: Autores.

Los elementos presentes en las nanopartículas de alofán se pueden observar en el grafico 1-3, en la que se puede apreciar la presencia de oxígeno aluminio y silicio que son elementos característicos del alofán. Los porcentajes de cada uno de estos elementos se muestra en la tabla 1-3.

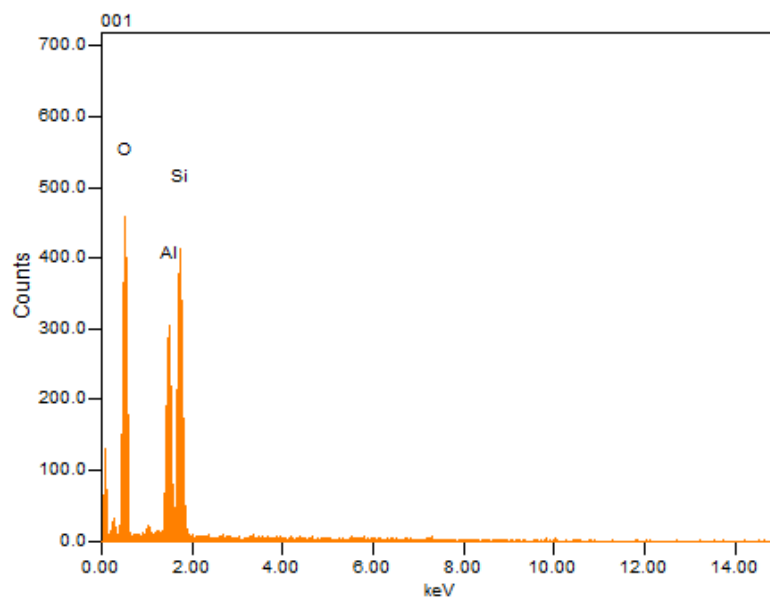


Gráfico 1-3: Elementos presentes en el alofán sintético.

Realizado por: Autores.

Tabla 1-3: Porcentaje de elementos presentes en el alofán sintético.

Elemento	Porcentaje en masa	Porcentaje en átomo	Sigma	Radio K
Oxígeno	5,44	72,05	0,07	0,0581358
Aluminio	1,45	11,38	0,03	0,0093559
Silicio	2,2	16,57	0,03	0,0169116
Total	9,09	100,00		

Realizado por: Autores

3.1.2 Caracterización mediante espectroscopia de infrarrojo (IR)

Para realizar la caracterización mediante este método se analizó el alofán en forma sólida.

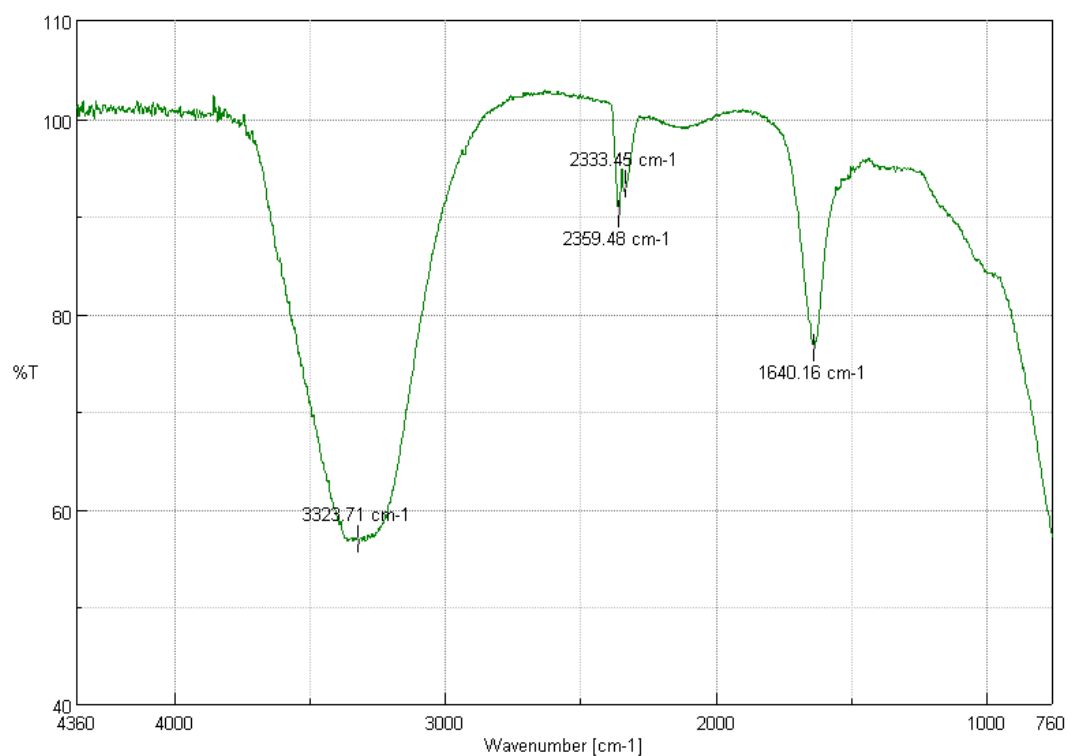


Gráfico 2-3: Espectro IR de alofán sólido.

Realizado por: Autores.

Los picos de estiramientos comprendidos entre $(4000-1500) \text{ cm}^{-1}$ se deben a la presencia de los grupos OH, mientras que los picos de estiramiento que están entre $(1500-760) \text{ cm}^{-1}$ se debe a la presencia de los enlaces Al-O, Si-O.

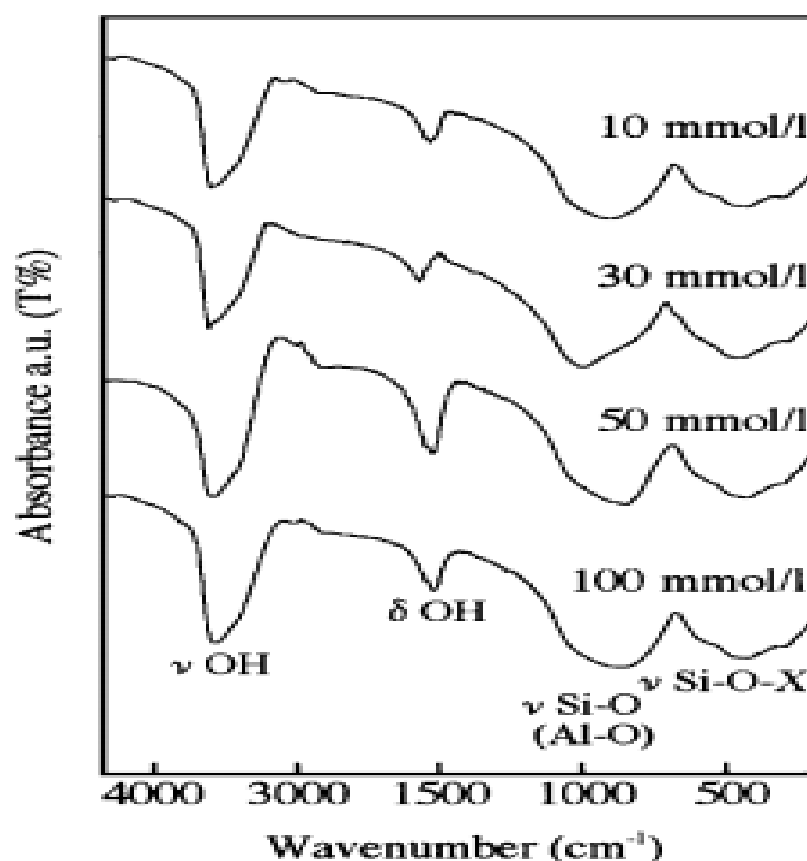


Gráfico 3-3: Espectro IR de alofán sintético con varias concentraciones iniciales.

Fuente: (Ohashi, et al., 2002, p. 454)

Al analizar el gráfico 2-3 y el gráfico 3-3 se puede observar que tienen espectros similares, por lo que se comprueba que las nanoparticulas sintetizadas son de alofán.

3.2 Pruebas experimentales al 15% de propilenglicol y al 0,5% de alofán.

3.2.1 Prueba N°1 con la válvula abierta al 100%

Tabla 2-3: Parámetros de la experimentación N°1.

Fecha	2019-06-28
Hora	9:55
Concentración	15%
Apertura de válvula	100%
Temperatura ambiente	21,6°C
Temperatura del nanorefrigerante	19,98°C

Realizado por: Autores.

Tabla 3-3: Resultados de la prueba N°1.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal $[\frac{l}{min}]$
0	19,98	0
5	17,95	34,81
10	15,91	34,81
15	13,97	34,8
20	12,05	34,8
25	10,11	34,78
30	8,19	34,78
35	6,29	34,74
40	4,48	34,7
45	2,88	34,66
50	1,29	34,53
55	-0,29	34,41
60	-1,74	34,28
65	-3,1	34,12
70	-4,02	34,07
75	-4,82	34,01
80	-5,4	33,95

Realizado por: Autores.

En esta prueba se pudo observar que al disminuir la temperatura se produce la aparición de escarcha en los componentes de la unidad condensadora lo que hace que el caudal disminuya como se muestra en la figura 2-3.



Figura 2-3: Aparición de escarcha en los elementos del equipo chiller

Realizado por: Autores.

Existe un enfriamiento continuo del refrigerante a partir del inicio de la prueba hasta su finalización, teniendo en cuenta el tiempo total de la prueba se puede realizar el cálculo de la velocidad de enfriamiento promedio para las pruebas que se van a efectuar posteriormente. Lo mencionado anteriormente se representa en la siguiente ecuación (Guaman & Muñoz, 2017):

$$V_{enf} = \frac{|T_f - T_o|}{t} \quad (16)$$

Donde:

V_{enf} = Velocidad de enfriamiento. [°C/min]

T_o = Temperatura inicial del refrigerante (mezcla). [°C]

T_f = Temperatura final del refrigerante (mezcla). [°C]

t = Tiempo total de la prueba. [min]

La temperatura mínima en la prueba N°1 fue de -5,40 °C. En el transcurso de la prueba la velocidad de enfriamiento no es constante, por lo que se procede a graficar la variación de la temperatura con respecto al tiempo como se puede apreciar en la figura 4-3.

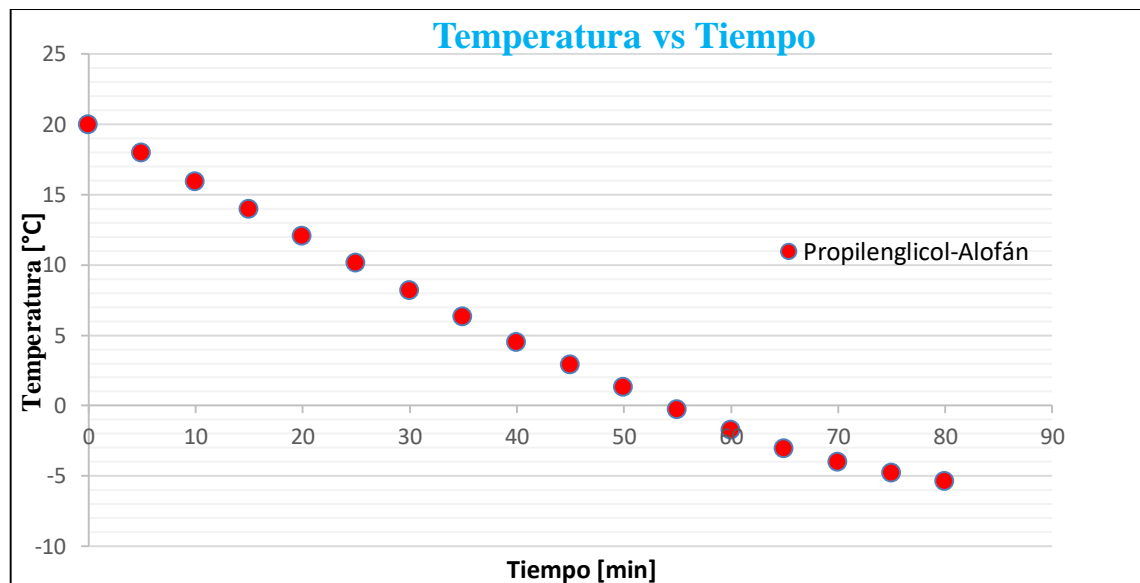


Gráfico 4-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°1.

Realizado por: Autores.

Aplicando la ecuación (16) se calcula la velocidad de enfriamiento.

$$V_{enf} = \frac{|-5,4 - 19,3|}{80}$$

$$V_{enf} = \frac{|-25,38|}{80}$$

$$V_{enf} = 0,32 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

3.2.2 Prueba N°2 con la válvula abierta al 75%

Tabla 4-3: Parámetros de la experimentación N°2.

Fecha	2019-07-01
Hora	11:38
Concentración	15%
Apertura de válvula	75%
Temperatura ambiente	21,4°C
Temperatura del nanorefrigerante	20,2°C

Realizado por: Autores.

Tabla 5-3: Resultados de la prueba N°2.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [$\frac{l}{min}$]
0	20,2	0
5	18,18	25,32
10	16,2	25,59
15	14,25	25,45
20	12,32	25,05
25	10,4	25,45
30	8,5	25,29
35	6,63	25,29
40	4,83	25,32
45	3,18	25,39
50	1,78	25,4
55	0,43	25,45
60	-0,87	25,49
65	-1,97	25,59
70	-2,96	25,12
75	-3,82	24,98
80	-4,62	24,92
85	-5,31	24,92

Realizado por: Autores.

El cálculo de la velocidad de enfriamiento para esta prueba se muestra a continuación:

$$V_{enf} = \frac{|-5,31 - 20,2|}{85}$$

$$V_{enf} = \frac{|-25,51|}{85}$$

$$V_{enf} = 0,300 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

A continuación, se muestra la gráfica de la variación de la temperatura con respecto al tiempo con una apertura de válvula del 75%, en la que se evidencia que el tiempo que se demora en enfriar la solución aproximadamente a la temperatura de $-5,31^{\circ}\text{C}$ es de 85 minutos.

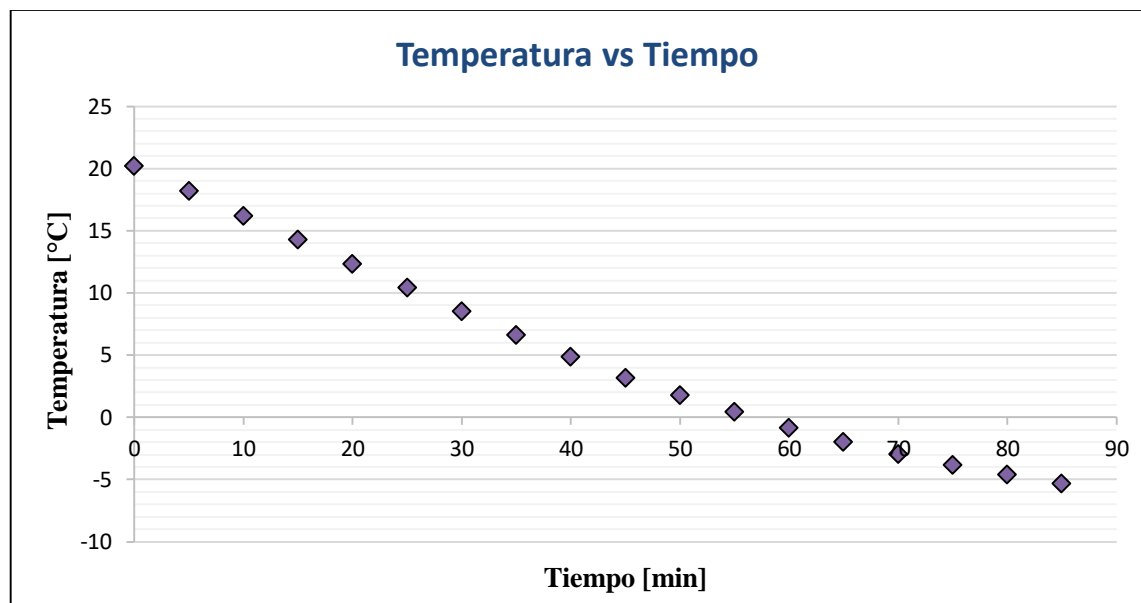


Gráfico 5-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°2.

Realizado por: Autores.

3.2.3 Prueba N°3 con la válvula abierta al 50%

Tabla 6-3: Parámetros de la experimentación N°3.

Fecha	2019-07-03
Hora	09:00
Concentración	15%
Apertura de válvula	50%
Temperatura ambiente	22,3°C
Temperatura del nanorefrigerante	20,65°C

Realizado por: Autores.

Tabla 7-3: Resultados de la prueba N°3.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [$\frac{l}{min}$]
0	20,65	0
5	18,75	17,76
10	16,85	17,7
15	15,01	17,6

Tabla 7-3(Continúa): Resultados de la prueba N°3.

20	13,19	17,53
25	11,39	17,3
30	9,6	17
35	7,83	17,23
40	6,1	17,33
45	4,6	17,21
50	3,11	17,17
55	1,66	17,17
60	0,26	17,12
65	-1,08	17,08
70	-2,03	17,05
75	-2,93	16,98
80	-3,73	16,93
85	-4,51	16,89
90	-5,04	16,86
95	-5,37	16,8

Realizado por: Autores

El cálculo de la velocidad de enfriamiento para esta prueba se muestra a continuación:

$$V_{enf} = \frac{|-5,37 - 20,65|}{95}$$

$$V_{enf} = \frac{|-26,02|}{95}$$

$$V_{enf} = 0,2738 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

Con los resultados de la toma de datos se procede a realizar la gráfica de la variación de la temperatura en función del tiempo a una apertura de válvula del 50%, al igual que en la prueba anterior el tiempo de duración de la prueba aumenta a 95 minutos.

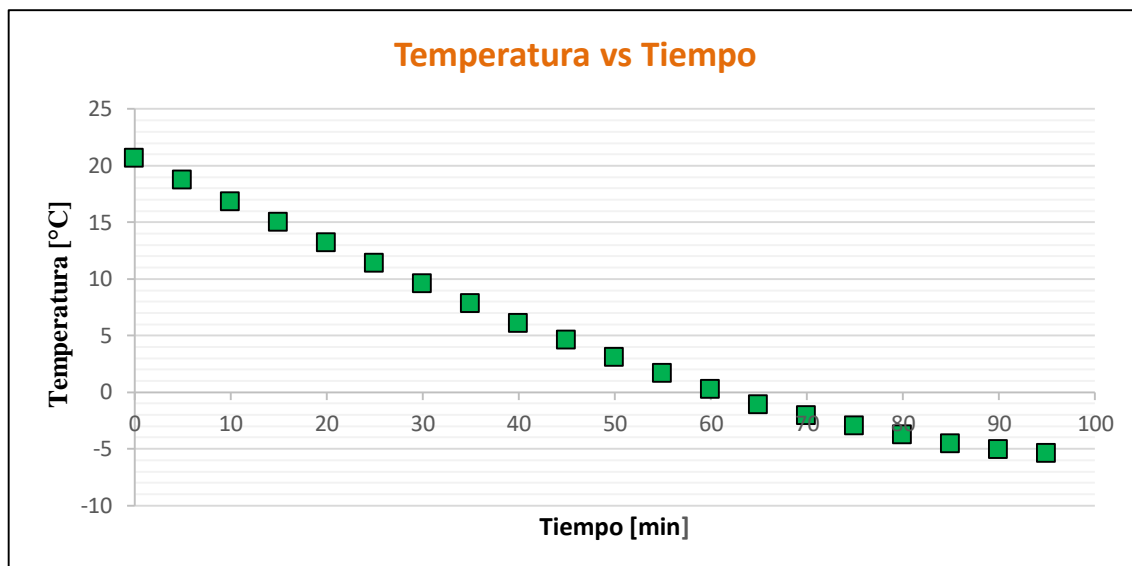


Gráfico 6-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°3.

Realizado por: Autores.

3.2.4 Curvas de enfriamiento al 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán.

A continuación, se muestran los resultados de las variaciones de la temperatura con respecto al tiempo para una concentración del 15% y distintas aperturas de válvula. La velocidad de enfriamiento depende del caudal de circulación, mientras la apertura de válvula disminuye lo hace también la velocidad de enfriamiento debido a que existe una menor transferencia de calor en el intercambiador de placas.

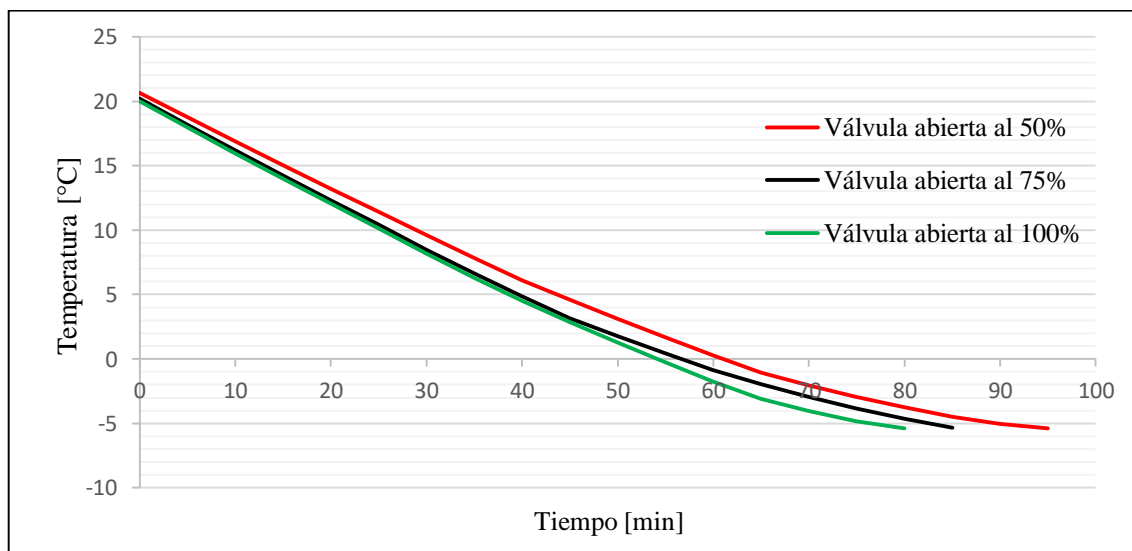


Gráfico 7-3: Variación de la temperatura vs tiempo para el 15% de concentración.

Realizado por: Autores.

En el gráfico 8-3 se muestran las variaciones de los caudales a diferente apertura de válvula con respecto al tiempo. En los tres casos se observa que el caudal se mantiene relativamente constante hasta llegar a la temperatura de congelación donde la bomba realiza un mayor esfuerzo.

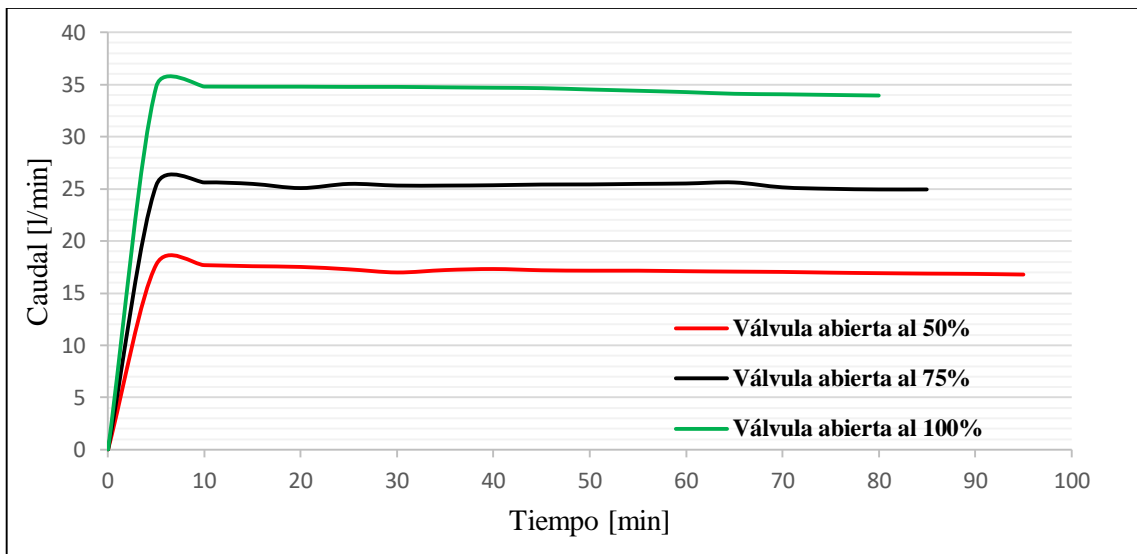


Gráfico 8-3: Variación del caudal vs tiempo para el 15% de concentración.

Realizado por: Autores.

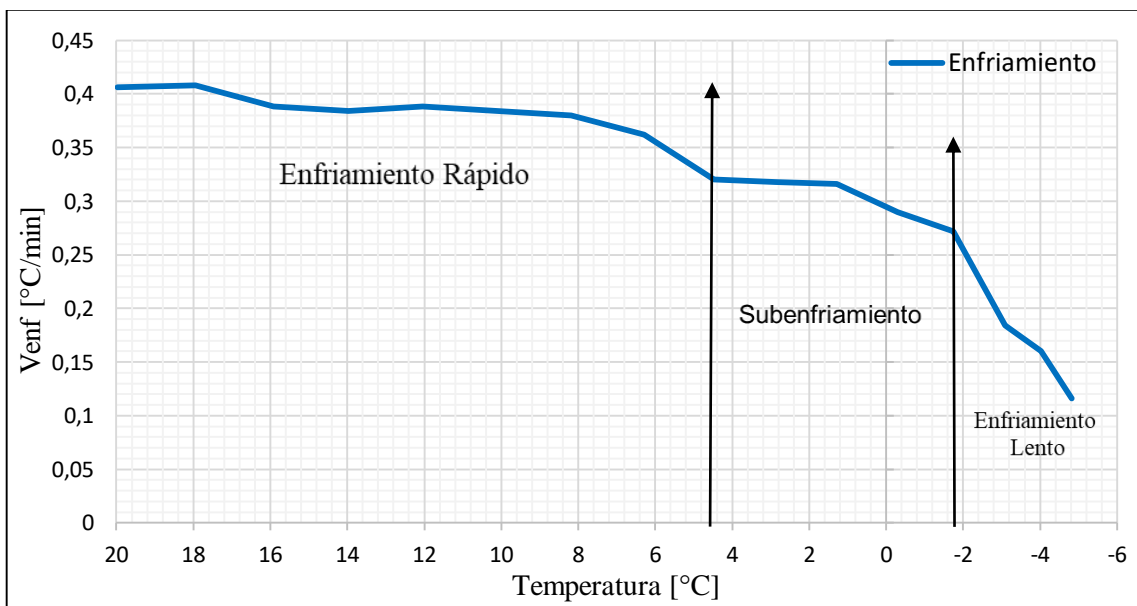


Gráfico 9-3: Velocidad de enfriamiento vs Temperatura al 15% de propilenglicol

Realizado por: Autores.

3.3 Pruebas experimentales al 21% de propilenglicol y al 0,5% de alopán.

3.3.1 Prueba N°4 con la válvula abierta al 100%

Tabla 8-3: Parámetros de la experimentación N°4.

Fecha	2019-07-08
Hora	08:30
Concentración	21%
Apertura de válvula	100%
Temperatura ambiente	19,8°C
Temperatura del nanorefrigerante	18,77°C

Realizado por: Autores

Tabla 9-3: Resultados prueba N°4.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [$\frac{l}{min}$]
0	18,77	0
5	16,73	33,17
10	14,66	33,16
15	12,72	33,16
20	10,95	33,15
25	9,21	33,14
30	7,46	33,11
35	5,80	33,10
40	4,11	33,10
45	2,69	33,07
50	1,23	33,05
55	-0,19	33,04
60	-1,58	33,01
65	-2,94	32,92
70	-4,25	32,87
75	-5,44	32,85
80	-6,59	31,21
85	-7,5	28,57

Realizado por: Autores

Como se puede observar en la figura 3-3, se produce un congelamiento en el intercambiador de calor y la bomba debido a las bajas temperaturas, esto ocasiona que el caudal disminuya notablemente.



Figura 3-3: Congelamiento del intercambiador de calor y de la bomba

Realizado por: Autores.

Existe un enfriamiento continuo del refrigerante a partir del inicio de la prueba hasta su finalización. La temperatura mínima que alcanzo el refrigerante secundario en esta prueba y a esta concentración fue de $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. la variación de la temperatura con respecto al tiempo se observa a continuación.

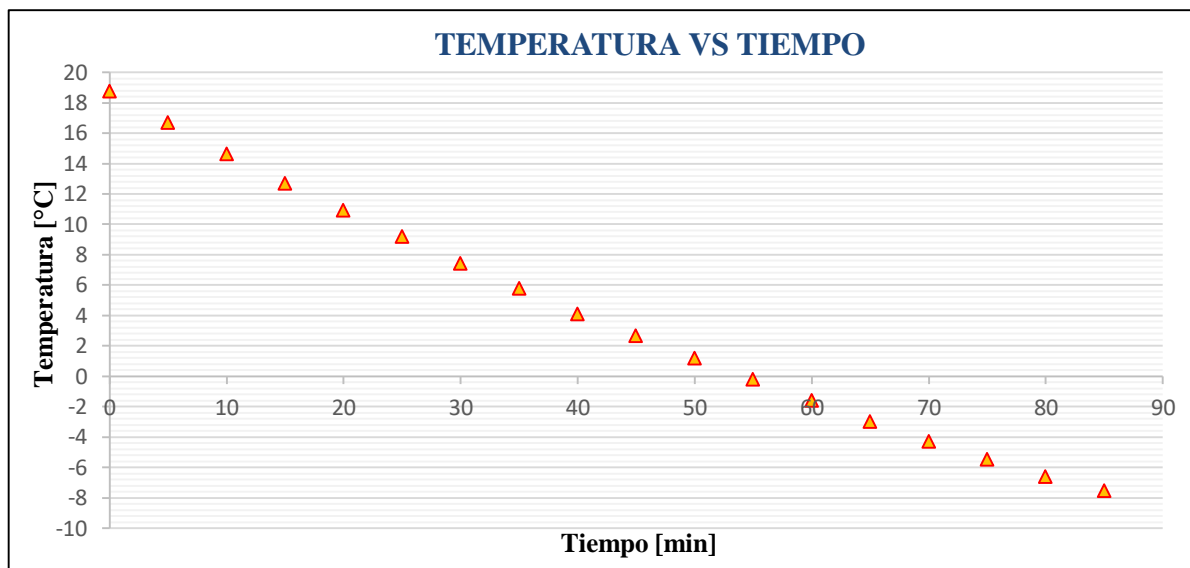


Gráfico 10-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°4

Realizado por: Autores

El cálculo de la velocidad de enfriamiento se muestra a continuación:

$$V_{enf} = \frac{|-7,5 - 18,77|}{85}$$

$$V_{enf} = \frac{|-26,27|}{85}$$

$$V_{enf} = 0,3090 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

3.3.2 Prueba N°5 con la válvula abierta al 75%

Tabla 10-3: Parámetros de la experimentación N°5.

Fecha	2019-07-10
Hora	10:00
Concentración	21%
Apertura de válvula	75%
Temperatura ambiente	21,4°C
Temperatura del nanorefrigerante	19,4°C

Realizado por: Autores

Tabla 11-3: Resultados de la prueba N°5.

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [$\frac{l}{min}$]
0	19,4	0
5	17,45	25,87
10	15,61	25,86
15	13,83	25,86
20	12,19	25,79
25	10,59	25,71
30	9,04	25,64
35	7,54	25,58
40	6,09	25,47
45	4,69	25,39
50	3,31	25,34
55	1,93	25,33
60	0,63	25,26
65	-0,65	25,14
70	-1,84	25,05
75	-3,02	24,92
80	-4,12	24,85
85	-5,07	24,8
90	-5,97	24,47
95	-6,77	24,11
100	-7,45	24,09

Realizado por: Autores

Con los datos de la tabla se realiza la gráfica de la variación de la temperatura con respecto al tiempo con apertura de válvula del 75%. La temperatura mínima que alcanzó la solución es de -7,45°C en un tiempo aproximado de 100 minutos.

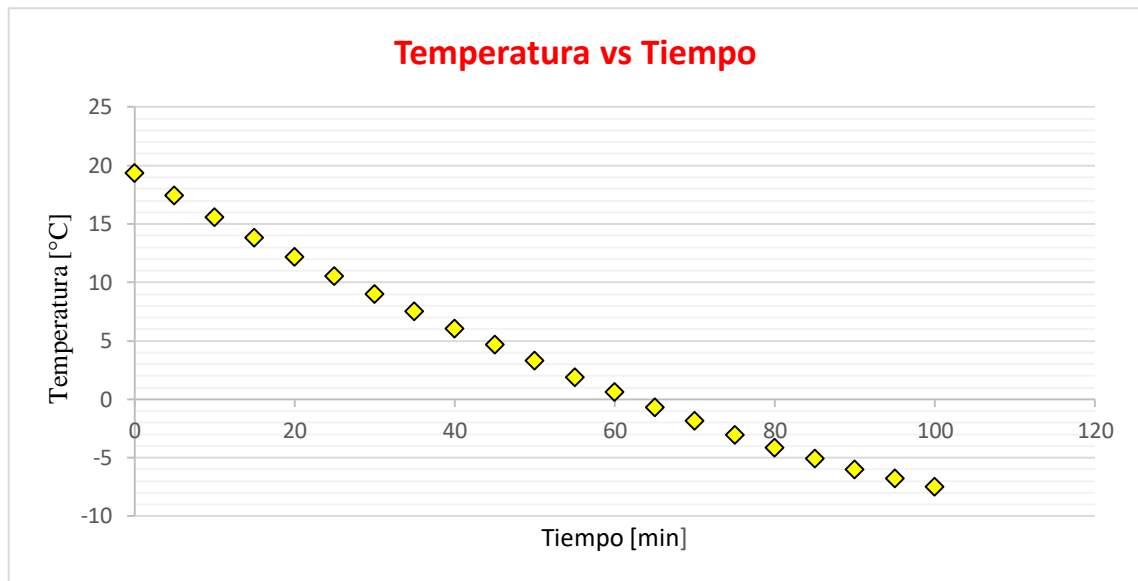


Gráfico 11-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°5.

Realizado por: Autores.

El cálculo de la velocidad de enfriamiento para esta prueba se muestra a continuación:

$$V_{enf} = \frac{|-7,45 - 19,4|}{95}$$

$$V_{enf} = \frac{|-26,85|}{100}$$

$$V_{enf} = 0,2685 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

3.3.3 Prueba N°6 con la válvula abierta al 50%

Tabla 12-3: Parámetros de la experimentación N°6.

Fecha	2019-07-12
Hora	11:38
Concentración	21%
Apertura de válvula	50%
Temperatura ambiente	20,2°C
Temperatura del nanorefrigerante	19,35°C

Realizado por: Autores.

Tabla 13-3: Parámetros de la experimentación N°6.

Tiempo [min]	Temperatura[°C]	Caudal [l/min]
0	19,35	0
5	17,58	16,77
10	15,83	16,79
15	14,08	16,75
20	12,48	16,75
25	11	16,75
30	9,52	16,75
35	8,17	16,64
40	6,88	16,64
45	5,63	16,59
50	4,42	16,55
55	3,22	16,55
60	2	16,54
65	0,85	16,5
70	-0,25	16,47
75	-1,45	16,43
80	-2,45	16,43
85	-3,41	16,41
90	-4,33	16,4
95	-5,21	15,85
100	-6,07	15,85
105	-6,79	15,8
110	-7,39	15,72

Realizado por: Autores.

Al igual que en la prueba anterior se procede a graficar la variación de la temperatura con respecto al tiempo con apertura de válvula del 50%. la temperatura mínima que alcanzó la solución es de -7,39 en un tiempo aproximado de 110 minutos.

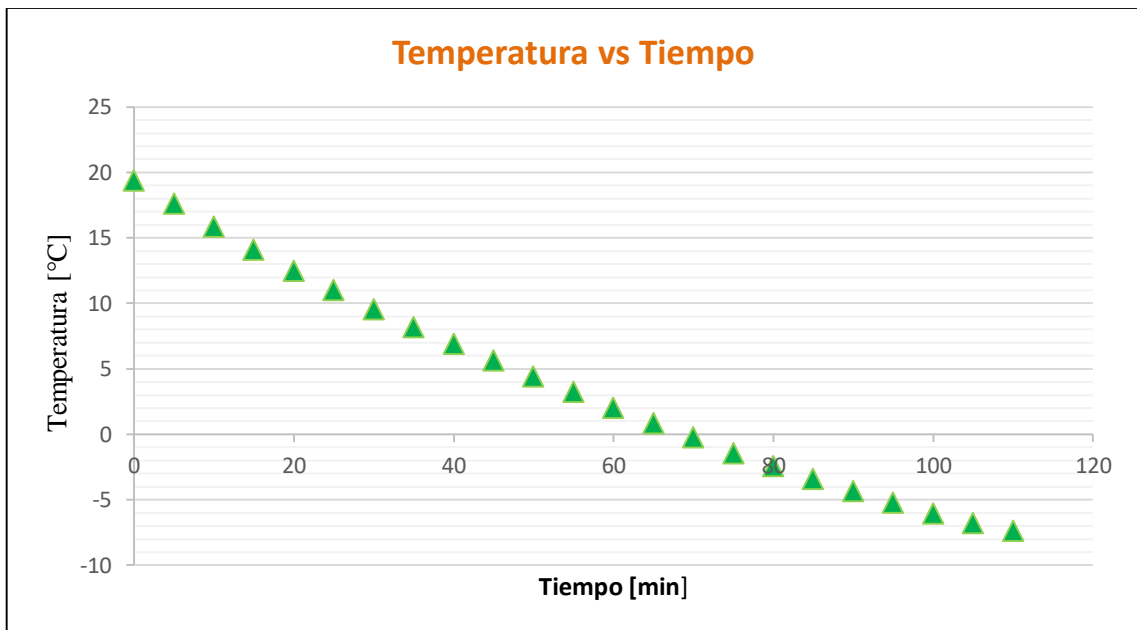


Gráfico 12-3: Variación de la temperatura vs tiempo de la prueba N°6.

Realizado por: Autores.

El cálculo de la velocidad de enfriamiento para esta prueba se muestra a continuación:

$$V_{enf} = \frac{|-7,39 - 19,35|}{110}$$

$$V_{enf} = \frac{|-26,74|}{110}$$

$$V_{enf} = 0,2430 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

3.4 Curvas de enfriamiento al 21% de propilenglicol y 0,5% de alopán.

En el grafico 13-3 se puede observar la curva de enfriamiento temperatura vs tiempo para cada apertura de válvula. Se pudo constatar que con la apertura de válvula al 100% se obtuvo una velocidad de enfriamiento superior a las demás puesto que se tiene la máxima eficiencia de la bomba a esa apertura.

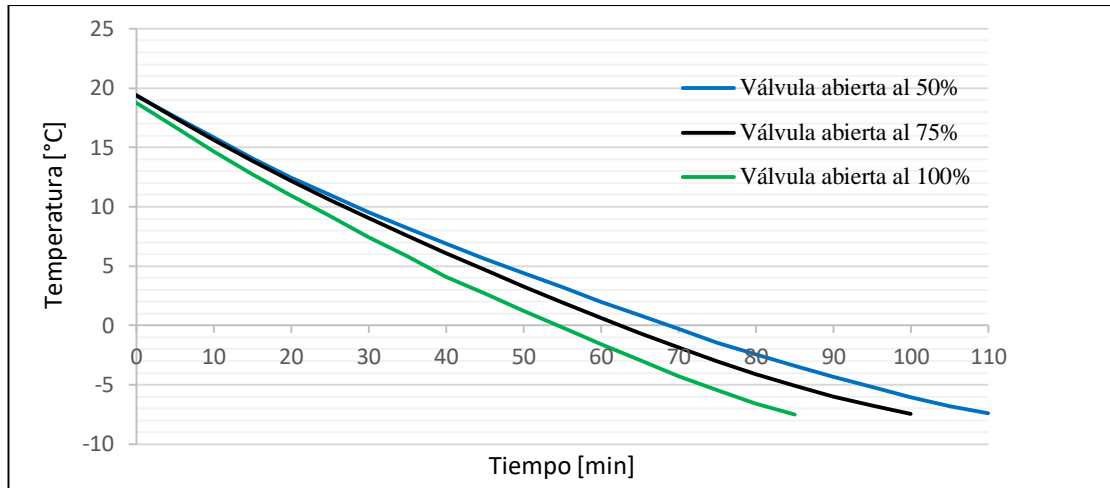


Gráfico 13-3: Variación de temperatura vs tiempo para el 21% de concentración

Realizado por: Autores.

La variación del caudal con respecto al tiempo para distintas aperturas de válvulas se puede ver a continuación. Existe una disminución del caudal al final de la prueba con una apertura de válvula del 100%, esto puede ser causado por el aumento de la viscosidad y por estar a una temperatura cercana a la de congelación.

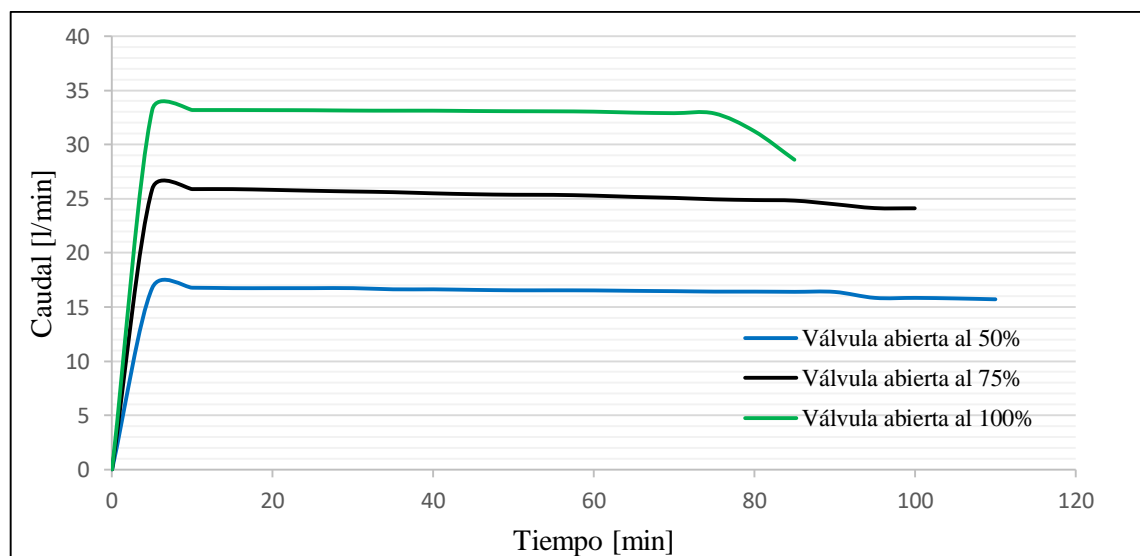


Gráfico 14-3: Variación del caudal vs tiempo para el 21% de concentración.

Realizado por: Autores.

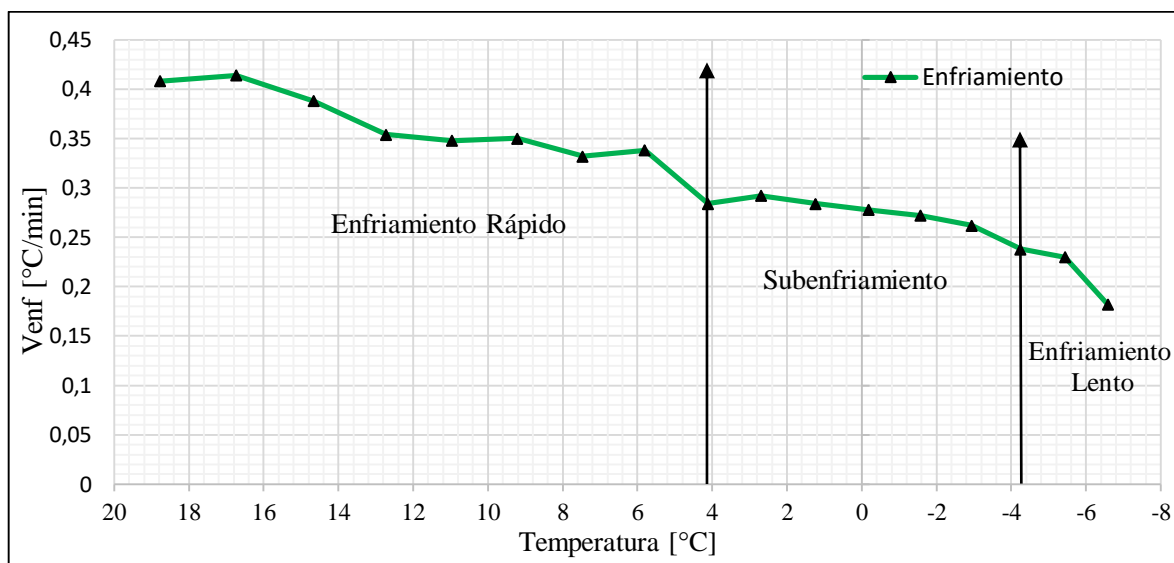


Gráfico 15-3: Velocidad de enfriamiento vs Temperatura al 15% de propilenglicol.

Realizado por: Autores.

3.5 Análisis comparativo

Después de haber realizado las pruebas con la mezcla de propilenglicol y alofán, a las concentraciones de 15% y 21% de propilenglicol, y al 0,5% de nanopartículas de alofán con una apertura de válvula del 100%, 75%, 50%, se procede a comparar con los datos obtenidos de la solución a base de propilenglicol.

3.5.1 Análisis comparativo al 15% de concentración.

El análisis comparativo se lo realizó mediante graficas del comportamiento de la temperatura y del caudal de las dos soluciones en función del tiempo.

3.5.1.1 Análisis comparativo con la válvula abierta al 100%

En el gráfico 16-3 se puede notar que la solución en base propilenglicol alcanza una temperatura de $-4,3^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 120 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de $-5,4^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 80 minutos.

Se puede apreciar claramente que la solución con nanopartículas de alofán llega a una temperatura de $-4,3^{\circ}\text{C}$ aproximadamente en 74 minutos, con lo que se concluye que esta solución se enfría más rápido en comparación con la solución a base de propilenglicol.

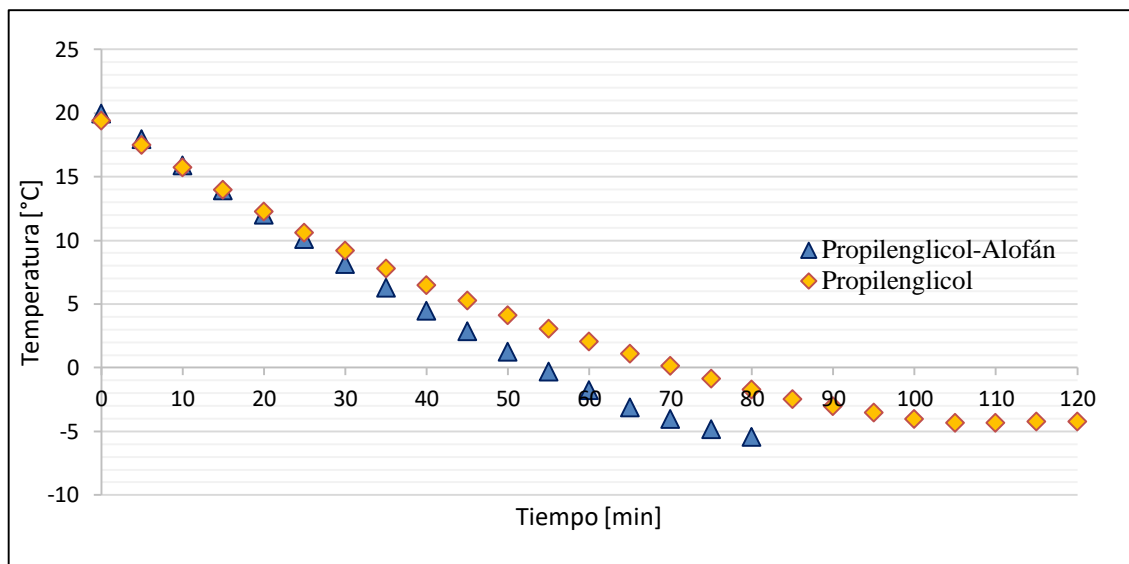


Gráfico 16-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 100%.

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante hasta el minuto 90 después de este tiempo existe una disminución del mismo, debido al incremento de su viscosidad a temperaturas bajas. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y se mantiene constante durante casi toda la prueba.

En el gráfico 17-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

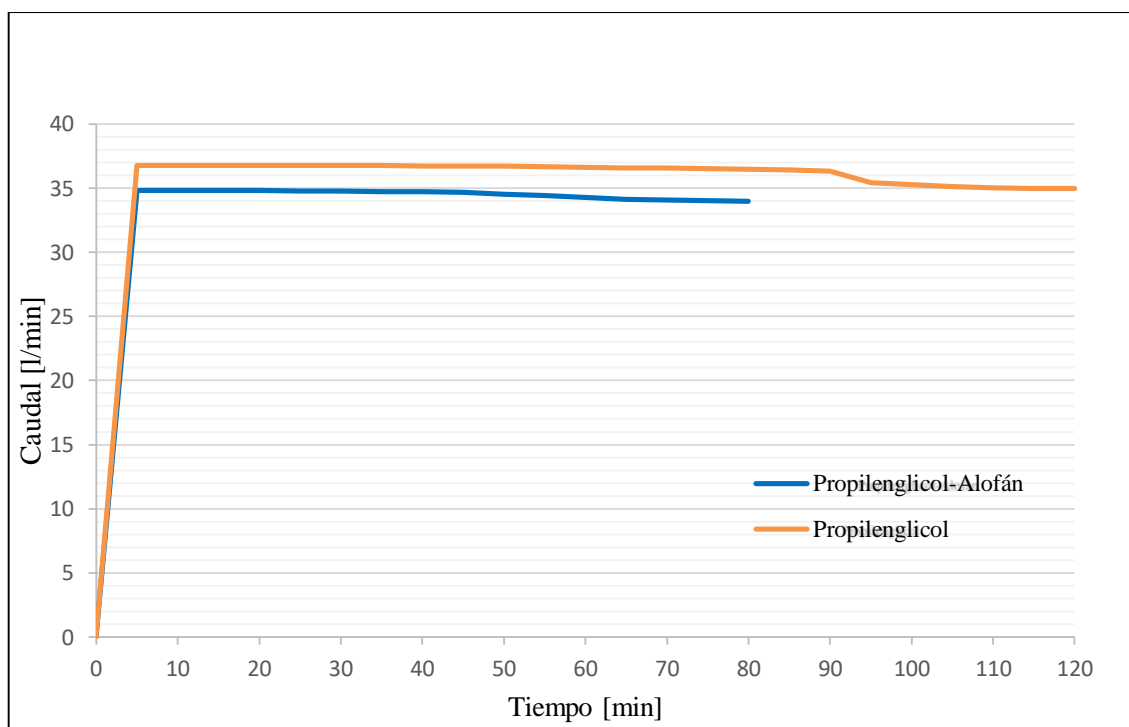


Gráfico 17-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 100%.

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 14-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 14-3: Resultados del análisis de la velocidad de enfriamiento prueba N°1.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,2258	0,317	0,0912
Punto de congelación[°C]	-4,3	-5,4	-1,1

Realizado por: Autores.

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 26,87% y se alcanza una temperatura de congelación de -5,4°C.

3.5.1.2 Análisis comparativo con la válvula abierta al 75%

En el gráfico 18-3 se puede notar que la solución en base propilenglicol alcanza una temperatura de -4,07°C en un tiempo de 110 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de -5,31°C en un tiempo de 85 minutos.

Se puede apreciar claramente que la solución con nanopartículas de alofán llega a una temperatura de -4,07°C aproximadamente en 77 minutos, con lo que se concluye que esta solución se enfría más rápido en comparación con la solución a base de propilenglicol.

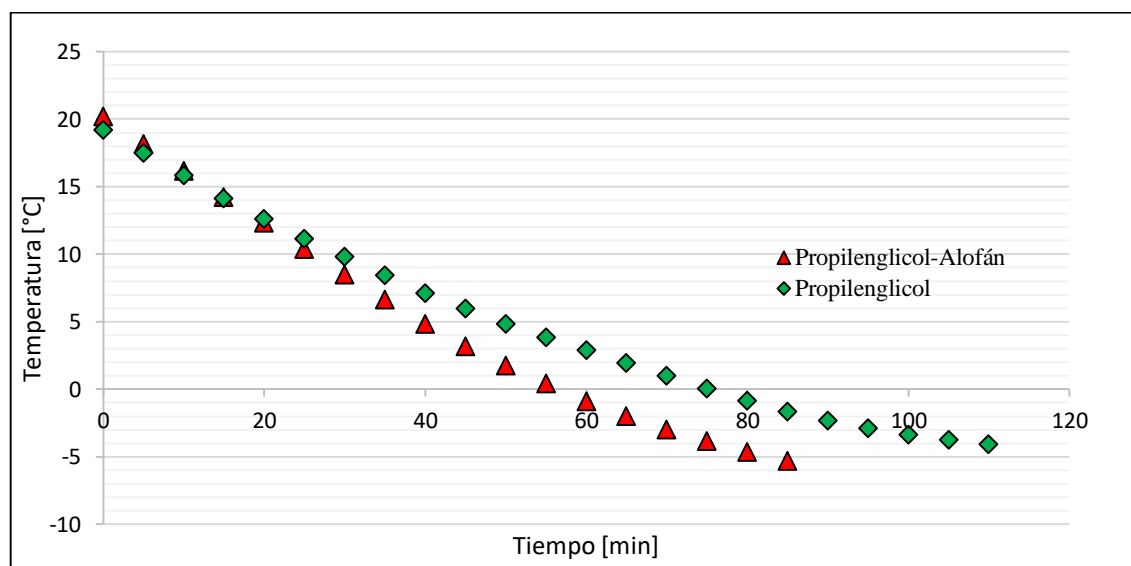


Gráfico 18-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 75%.

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante hasta el minuto 65 después de este tiempo existe una disminución del mismo no considerable. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y tiene un comportamiento casi constante.

En el gráfico 6-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

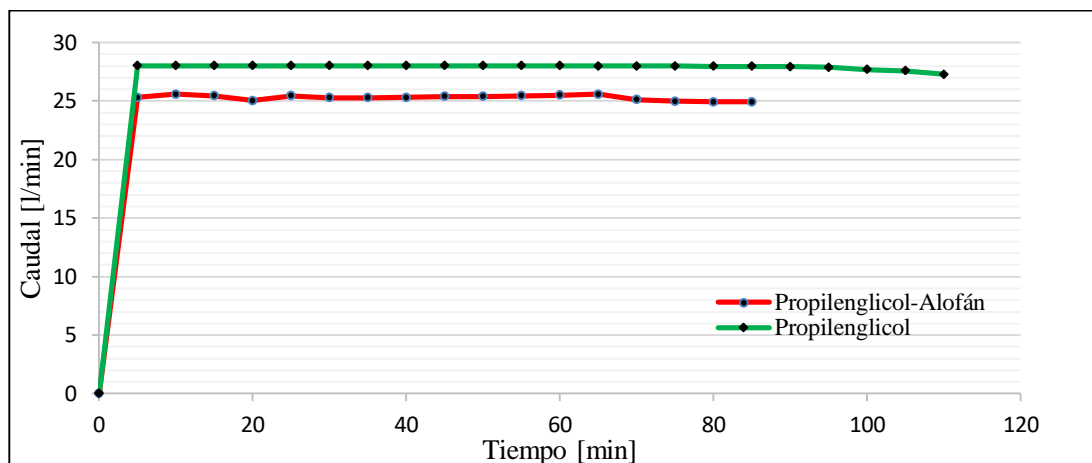


Gráfico 19-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 75%.

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 15-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 15-3: Resultados del análisis de la velocidad de enfriamiento prueba N°2.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,2112	0,300	0,083
Punto de congelación[°C]	-4,07	-5,31	-1,1

Realizado por: Autores.

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 29,6% y se alcanza una temperatura de congelación de -5,31°C.

3.5.1.3 Análisis comparativo con la válvula abierta al 50%

En el gráfico 20-3 se puede notar que la solución en base propilenglicol alcanza una temperatura de -4°C en un tiempo de 115 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de -5,37°C en un tiempo de 95 minutos.

Se puede apreciar claramente que la solución con nanopartículas de alofán llega a una temperatura de -4°C aproximadamente en 82 minutos, con lo que se concluye que esta solución se enfría más rápido en comparación con la solución a base de propilenglicol.

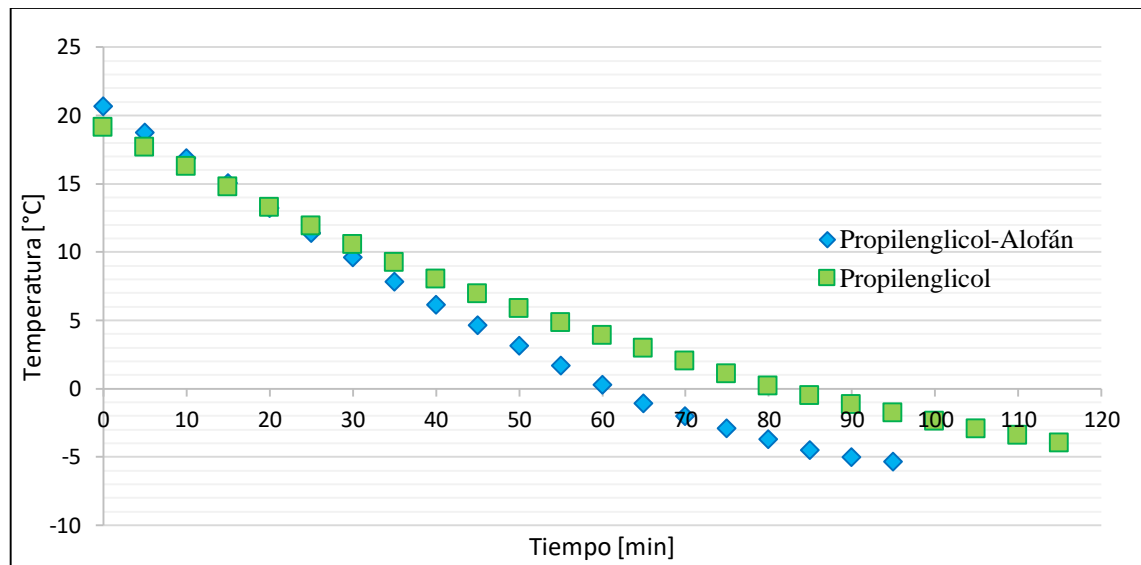


Gráfico 20-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 50%.

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante durante el transcurso de la prueba. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y se mantiene casi constante, llegando a tener una disminución de casi 1 lt/min de su caudal inicial.

En el gráfico 21-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

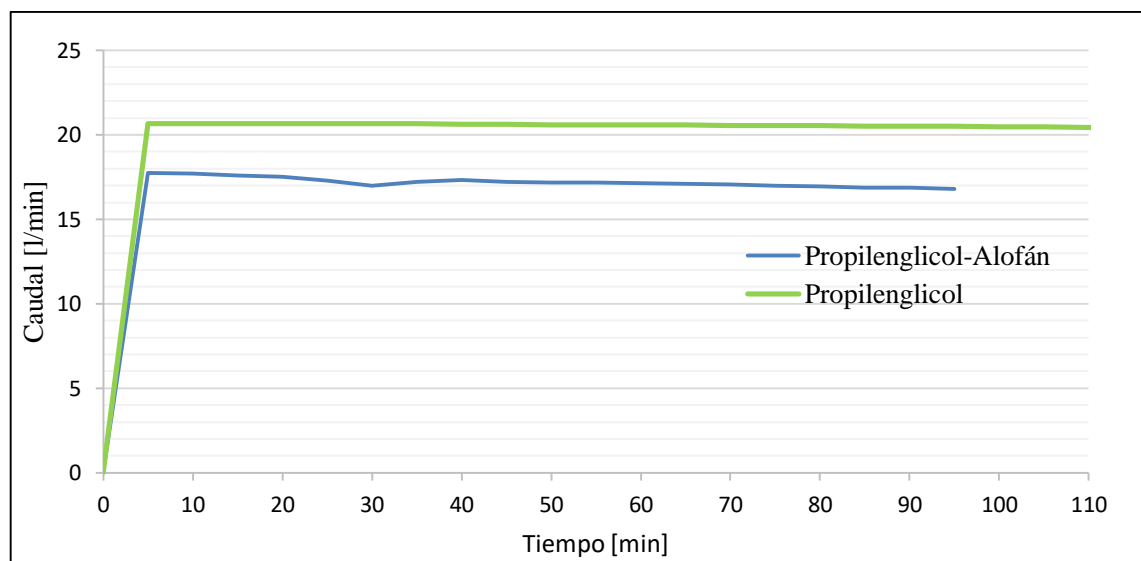


Gráfico 21-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 50%.

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 16-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 16-3: Resultados obtenidos del análisis comparativo de la prueba N°3.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,2011	0,2738	0,083
Punto de congelación[°C]	-4	-5,37	-1,37

Realizado por: Autores.

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 26,55% y se alcanza una temperatura de congelación de -5,37°C.

3.5.2 Análisis comparativo al 21% de concentración

Al igual que el caso anterior se realiza un análisis comparativo de las dos soluciones mediante graficas del comportamiento de la temperatura y el caudal en función del tiempo.

3.5.2.1 Análisis comparativo con la válvula abierta al 100%

En el gráfico 22-3 se puede notar que la mezcla de agua- propilenglicol alcanza una temperatura -7,19°C en un tiempo de 130 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de -7,5°C en un tiempo de 85 minutos.

El tiempo que se demora en llegar a la temperatura de -7,19°C la solución con nanopartículas de alofán es cercana a los 83 minutos, lo que quiere decir que se produce un enfriamiento más rápido.

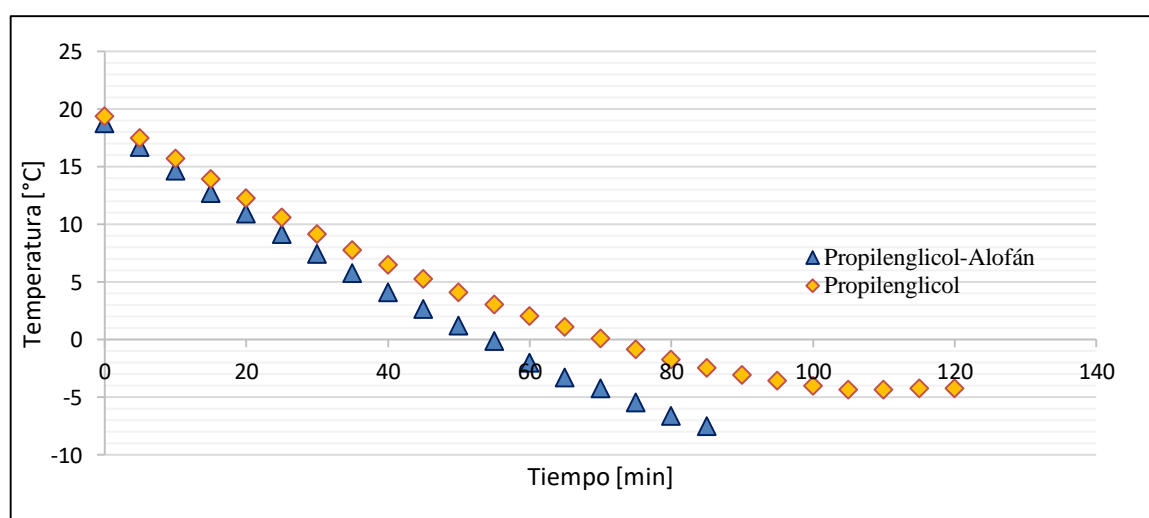


Gráfico 22-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula abierta al 100% .

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante hasta el minuto 120 después de este tiempo existe una disminución del mismo, debido al incremento de su viscosidad a temperaturas bajas. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y se mantiene constante hasta el minuto 75, a partir de este valor el caudal empieza a decrecer de manera considerable, llegando a tener

En el gráfico 23-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

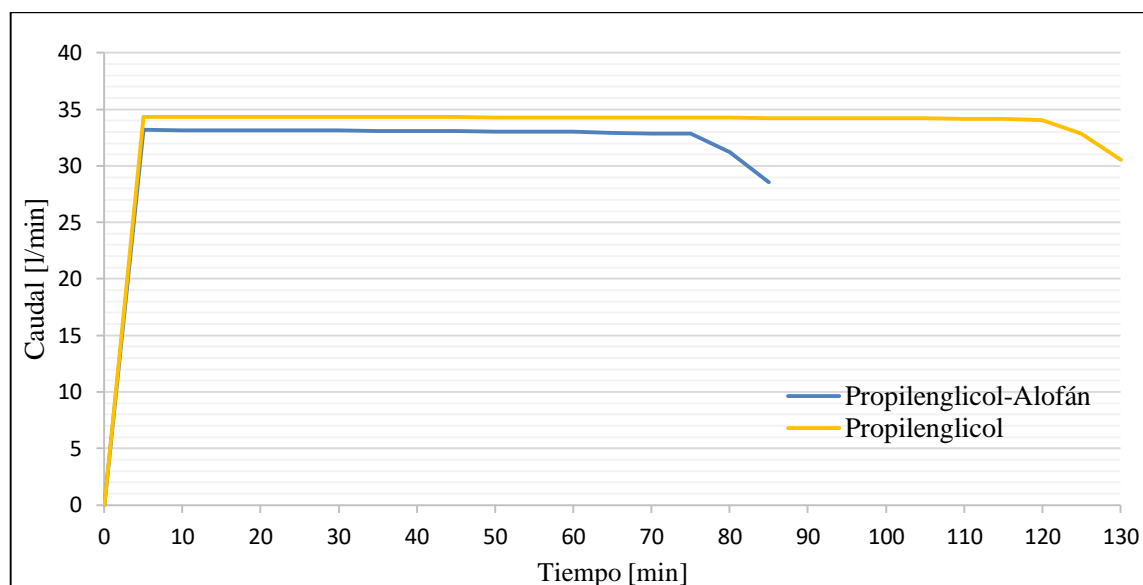


Gráfico 23-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 100%

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 17-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 17-3: Resultados obtenidos del análisis comparativo de la prueba N°4.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,2208	0,3090	0,0882
Punto de congelación[°C]	-7,19	-7,5	-0,31

Realizado por: Autores.

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 28,54% y se alcanza una temperatura de congelación de -7,5°C.

3.5.2.2 Análisis comparativo con la válvula abierta al 75%

En el gráfico 24-3 se puede notar que la mezcla de agua- propilenglicol alcanza una temperatura $-7,22^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 125 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de $-7,45^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 100 minutos.

El tiempo que se demora en llegar a la temperatura de $-7,22^{\circ}\text{C}$ la solución con nanopartículas de alofán es cercana a los 97 minutos, lo que quiere decir que se produce un enfriamiento más rápido.

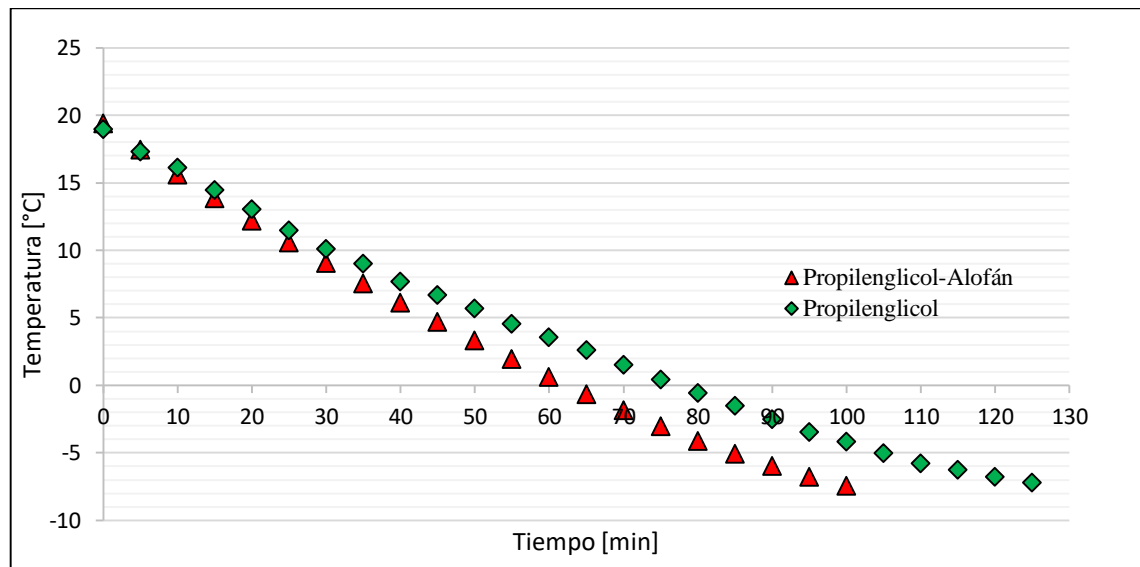


Gráfico 24-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula al 75% .

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y se mantiene constante hasta el minuto 70, a partir de este valor el caudal empieza a decrecer de manera no muy considerable.

En el gráfico 25-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

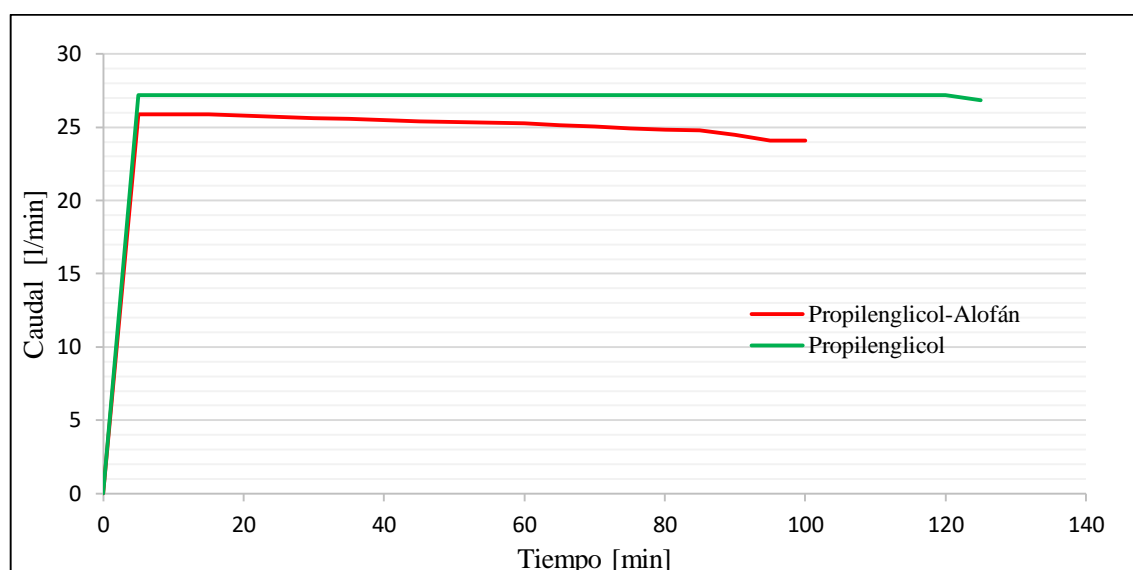


Gráfico 25-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 75%.

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 18-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 18-3: Resultados obtenidos del análisis comparativo al 21%.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,2093	0,2685	0,0592
Punto de congelación[°C]	-7,22	-7,45	-0,23

Realizado por: Autores

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 22,048% y se alcanza una temperatura de congelación de -7,45°C.

3.5.2.3 Análisis comparativo con la válvula abierta al 50%

En el gráfico 26-3 se puede notar que la mezcla de agua- propilenglicol alcanza una temperatura $-6,69^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 130 minutos, mientras que al añadir nanopartículas de alofán la solución llega a una temperatura de $-7,39^{\circ}\text{C}$ en un tiempo de 110 minutos.

El tiempo que se demora en llegar a la temperatura de $-6,69^{\circ}\text{C}$ la solución con nanopartículas de alofán es cercana a los 104 minutos, lo que quiere decir que se produce un enfriamiento más rápido.

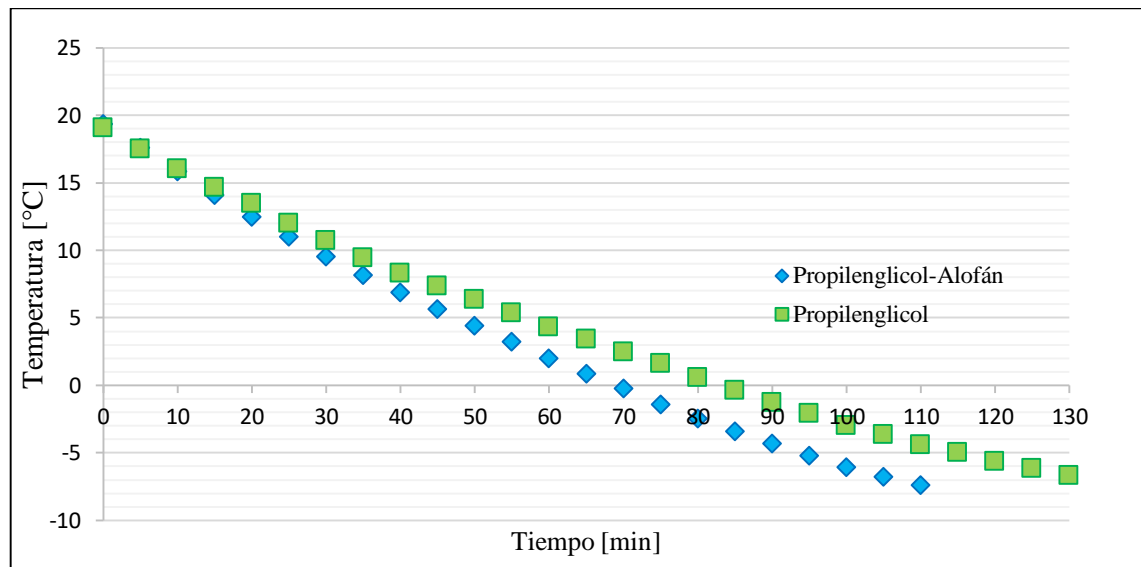


Gráfico 26-3: Variación de la temperatura vs tiempo con la válvula al 50% .

Realizado por: Autores.

En la solución a base propilenglicol el caudal es mayor y permanece constante hasta el minuto 115 después de este tiempo existe una disminución del mismo, debido al incremento de su viscosidad a temperaturas bajas. En cambio, al añadir nanopartículas de alofán el caudal es menor y se mantiene constante hasta el minuto 75, a partir de este valor el caudal empieza a decrecer de manera considerable.

En el gráfico 27-3 se muestra la variación del caudal en función del tiempo para las dos soluciones.

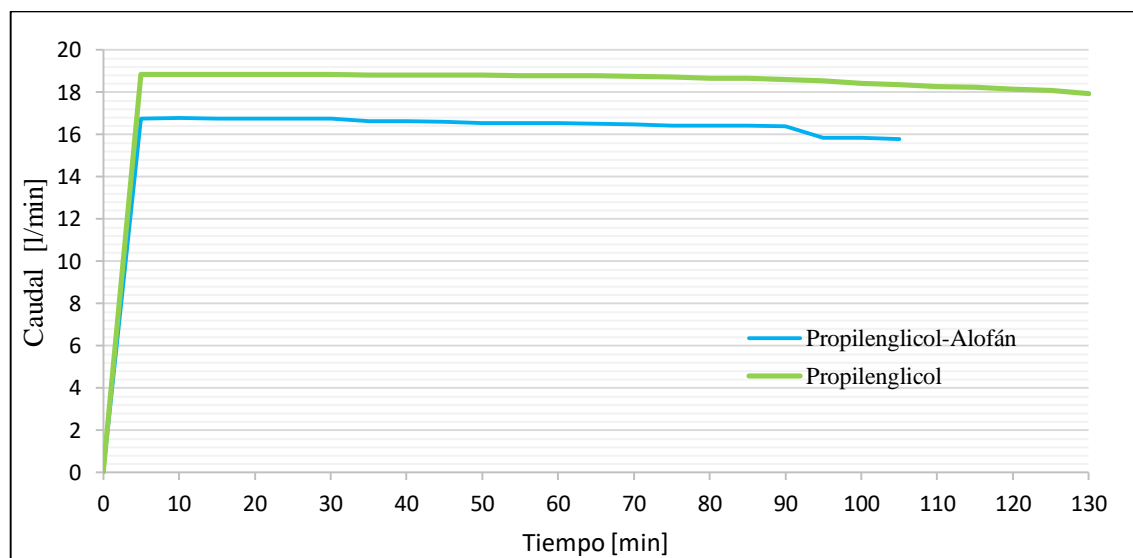


Gráfico 27-3: Variación del caudal vs tiempo con la válvula abierta al 50%.

Realizado por: Autores.

La velocidad de enfriamiento de las dos soluciones tiene una variación considerable, la cual se detalla en la tabla 19-3, así como también el incremento en valores de porcentajes y el punto de congelación de las mismas.

Tabla 19-3: Resultados obtenidos del análisis comparativo al 21%.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
V enfr.[°C/min]	0,198	0,2430	0,045
Punto de congelación[°C]	-6,69	-7,39	-0,7

Realizado por: Autores

Al realizar el análisis comparativo de las dos soluciones se puede apreciar que al añadir nanopartículas de alofán, la velocidad de enfriamiento incrementa en un 18,518% y se alcanza una temperatura de congelación de -7,39°C.

3.6 Determinación de la capacidad calorífica

A continuación, se muestran los datos obtenidos y el cálculo de la capacidad calorífica a diferentes concentraciones de agua, propilenglicol y alofán.

3.6.1 Constante del calorímetro

Datos experimentales:

Tabla 20-3: Datos para el cálculo de la constante del calorímetro.

N° de Ensayo	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$m_1(\text{g})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$m_2(\text{g})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
1	22	75,846	70	72,837	42
2	23	74,788	70	71,834	42

Realizado por: Autores.

Donde:

$T_1 = \text{temperatura del agua fría } [^{\circ}\text{C}]$

$m_1 = \text{masa del agua fría } [\text{g}]$

$T_2 = \text{temperatura del agua caliente } [^{\circ}\text{C}]$

$m_2 = \text{masa del agua caliente } [\text{g}]$

$T_3 = \text{temperatura de equilibrio } [^{\circ}\text{C}]$

Cálculo de la constante del calorímetro.

Utilizando la ecuación (7) se calcula la constante del calorímetro de cada ensayo para luego sacar un promedio entre las dos, lo cual nos servirá para los cálculos posteriores.

$$K_1 = 72,837 * \frac{70 - 42}{42 - 22} - 75,85$$

$$K_1 = 26,12 \text{ g}$$

$$K_2 = 71,834 * \frac{70 - 42}{42 - 23} - 74,79$$

$$K_2 = 31,07 \text{ g}$$

$$K = \frac{K_1 + K_2}{2} = \frac{26,12 + 31,07}{2}$$

$$K = 28,60 \text{ g}$$

3.6.2 Calor específico de la mezcla agua-propilenglicol

3.6.2.1 Capacidad calorífica al 15% de propilenglicol

Datos experimentales:

Tabla 21-3: Datos para calcular la capacidad calorífica al 15% de propilenglicol.

N° de Ensayo	$T_1(^{\circ}C)$	$m_1(g)$	$T_2(^{\circ}C)$	$m_2(g)$	$T_3(^{\circ}C)$
1	23	74,86	70	74,15	42

Realizado por: Autores

Donde:

$T_1 = \text{temperatura del agua fría } (^{\circ}C)$

$m_1 = \text{masa del agua fría } (g)$

$T_2 = \text{temperatura del fluido caliente } (^{\circ}C)$

$m_2 = \text{masa del fluido caliente } (g)$

$T_3 = \text{temperatura de equilibrio } (^{\circ}C)$

El cálculo de la capacidad calorífica se lo realiza utilizando la ecuación (10) se calcula el calor específico del fluido en estudio; Esta ecuación nos servirá para todos los cálculos que se realizarán más adelante. Luego se calcula la capacidad calorífica multiplicando el valor obtenido por la masa del fluido.

Datos adicionales:

$$C_{pH_2O} = 4,184 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$m_{\text{fluido}} = 181,08 \text{ kg}$$

$$C_e = \frac{4,184(74,86 + 28,60)(42 - 23)}{74,25(70 - 42)}$$

$$C_e = 3,96 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$C = m * C_e$$

$$C = 181080 * (3,96)$$

$$C = 717,08 \text{ KJ/}^{\circ}C$$

3.6.2.2 Capacidad calorífica al 21% de propilenglicol

Datos experimentales:

Tabla 22-3: Datos para calcular la capacidad calorífica al 21% de propilenglicol.

N° de Ensayo	$T_1(^{\circ}C)$	$m_1(g)$	$T_2(^{\circ}C)$	$m_2(g)$	$T_3(^{\circ}C)$
1	23	74,25	72	72,21	42

Realizado por: Autores

Donde:

T_1 = temperatura del agua fría ($^{\circ}C$)

m_1 = masa del agua fría (g)

T_2 = temperatura del fluido caliente ($^{\circ}C$)

m_2 = masa del fluido caliente (g)

T_3 = temperatura de equilibrio ($^{\circ}C$)

Calculo de la capacidad calorífica.

Datos adicionales:

$$C_{pH_2O} = 4,184 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$m_{fluido} = 181,51 \text{ kg}$$

$$C_e = \frac{4,184(74,25 + 28,6)(42 - 23)}{72,21(72 - 42)}$$

$$C_e = 3,77 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$C = 181512 * (3,77)$$

$$C = 684,3 \text{ KJ/}^{\circ}C$$

3.6.3 Capacidad calorífica de la mezcla agua-propilenglicol-alofán

3.6.3.1 Capacidad calorífica al 15% de propilenglicol y 0,5 % de alofán

Datos experimentales:

Tabla 23-3: Datos para la solución 15% propilenglicol- 0.5% alofán.

N° de Ensayo	$T_1(^{\circ}C)$	$m_1(g)$	$T_2(^{\circ}C)$	$m_2(g)$	$T_3(^{\circ}C)$
1	23	73,97	72	70,38	43

Realizado por: Autores

Donde:

T_1 = temperatura del agua fría ($^{\circ}C$)

m_1 = masa del agua fría (g)

T_2 = temperatura del fluido caliente ($^{\circ}C$)

m_2 = masa del fluido caliente (g)

T_3 = temperatura de equilibrio ($^{\circ}C$)

Calculo de la capacidad calorífica.

Datos adicionales:

$$C_{pH_2O} = 4,184 \frac{J}{g^{\circ}C}$$

$$m_{fluido} = 181,08 \text{ kg}$$

$$C_e = \frac{4,184(73,97 + 28,6)(43 - 23)}{70,38(72 - 43)}$$

$$C_e = 3,99 \frac{J}{g^{\circ}C}$$

$$C = 181,08 * (3,99)$$

$$C = 722,51 \text{ kJ}/^{\circ}C$$

3.6.3.2 Capacidad calorífica al 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán

Datos experimentales:

Tabla 24-3: Datos para la solución 21% propilenglicol- 0.5% alofán.

N° de Ensayo	$T_1(^{\circ}C)$	$m_1(g)$	$T_2(^{\circ}C)$	$m_2(g)$	$T_3(^{\circ}C)$
1	23	73,63	70	70,09	41

Realizado por: Autores.

Donde:

$T_1 = \text{temperatura del agua fría } (^{\circ}C)$

$m_1 = \text{masa del agua fría } (g)$

$T_2 = \text{temperatura del fluido caliente } (^{\circ}C)$

$m_2 = \text{masa del fluido caliente } (g)$

$T_3 = \text{temperatura de equilibrio } (^{\circ}C)$

Calculo de la capacidad calorífica.

Datos adicionales:

$$C_{pH_2O} = 4,184 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$m_{\text{fluido}} = 181,51 \text{ kg}$$

$$C_e = \frac{4,184(73,63 + 28,6)(41 - 23)}{70,09(70 - 41)}$$

$$C_e = 3,79 \text{ J/g } ^{\circ}C$$

$$C = 181512 * (3,79)$$

$$C = 687,57 \text{ KJ/}^{\circ}C$$

3.6.4 Análisis comparativo de la capacidad calorífica

En la tabla 25-3 se muestran los resultados del cálculo de la capacidad calorífica a diferentes concentraciones del agua, propilenglicol y alofán.

Tabla 25-3: Valores obtenidos de la capacidad calorífica.

Concentración	Sin Alofán	0,5% Alofán	Unidad
15% Propilenglicol	717,08	722,51	kJ/°C
21% Propilenglicol	684,3	687,57	kJ/°C

Realizado por: Autores

Como se puede observar en la tabla 25-3 existe un aumento en la capacidad calorífica al añadir nanopartículas de alofán aproximadamente de 5,43 kJ/°C a una concentración del 15% de propilenglicol, lo que representa un 0,7% en valores de porcentajes. De igual manera para la concentración del 21% de propilenglicol el incremento es de 3,27 kJ/°C, en valores de porcentaje representa un 0,4%.

3.7 Análisis del consumo de energía de las dos soluciones.

3.7.1 Cálculo de la potencia consumida por la unidad condensadora

El equipo chiller funciona con un voltaje de 220 V y la corriente que atraviesa es de 10,18 A obtenida de la medición con el amperímetro.

$$P_a = V * i$$

Donde:

P_a = Potencia aparente [VA]

V = Voltaje [V]

i = corriente [A]

$$P_a = 200 * 10,18$$

$$P_a = 2036 \text{ VA}$$

Para calcular la potencia real se utiliza un factor de potencia igual a 0,7 debido a que el equipo chiller no se encuentra funcionando al 100% de su capacidad.

$$P_r = F_p * P_a$$

Donde:

$$P_r = \text{Potencia real [W]}$$

$$P_a = \text{Potencia aparente [VA]}$$

$$F_p = \text{Factor de potencia [-]}$$

$$P_r = 0,7 * 2036$$

$$P_r = 1425,2 \text{ W}$$

3.7.2 Cálculo del consumo de energía para la concentración al 15%.

Para la solución a base de propilenglicol el tiempo que duro la prueba fue de 120 minutos, con este dato de tiempo se puede calcular la potencia consumida.

$$P_c = P_r * t$$

Donde:

$$P_c = \text{Potencia consumida [kWh]}$$

$$P_r = \text{Potencia real [W]}$$

$$t = \text{tiempo [h]}$$

$$P_c = 1425,2 * 2$$

$$P_c = 2,85 \text{ kWh}$$

Para la solución con nanopartículas de alofán el tiempo que duro la prueba fue de 80 minutos, con lo que tenemos:

$$P_c = 1425,2 * \frac{4}{3}$$

$$P_c = 1,93 \text{ kWh}$$

Como se puede observar en los cálculos anteriores la duración de la prueba disminuyo 40 min al añadir nanopartículas de alofán, lo que representa una diferencia de 0,91 kWh. Tomando en cuenta la tarifa eléctrica promedio que es de 9,9 centavos de dólar por kWh, según datos de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), se tiene un ahorro aproximado de 65,17 USD por año suponiendo que el equipo chiller se enciende dos veces al día.

3.7.3 Cálculo del consumo de energía para la concentración de 21%.

El tiempo de duración de la prueba a base de propilenglicol fue de 130 minutos.

$$P_c = 1425,2 * \frac{13}{6}$$
$$P_c = 3,15 \text{ kWh}$$

Para la solución con nanopartículas de alofán el tiempo que duro la prueba fue de 85 minutos.

$$P_c = 1425,2 * \frac{17}{12}$$
$$P_c = 2,06 \text{ kWh}$$

La duración de la prueba disminuyó 45 min al añadir nanopartículas de alofán, lo que representa una diferencia de 1,09 kWh. Como la tarifa eléctrica es de 9,9 centavos de dólar por kWh se tiene un ahorro aproximado de 77,63 USD por año suponiendo que el equipo chiller se enciende dos veces al día.

Tabla 26-3: Análisis del consumo de energía

SOLUCIÓN	Consumo de energía del Chiller [kWh]	Ahorro de energía [kWh]
Propilenglicol al 15%	2,85	0,92
Propilenglicol-Alofán (15%)	1,93	
Propilenglicol al 21%	3,15	1,09
Propilenglicol-Alofán (21%)	2,06	

Fuente: Autores.

CONCLUSIONES

Con la búsqueda y análisis de información relevante se logró entender de mejor manera el proceso de refrigeración, así como también la implementación de nanofluidos que ayuden a mejorar estos sistemas debido a que existe una gran demanda en esta área de aplicación.

Mediante la caracterización en el microscopio electrónico de barrido se pudo observar que las nanopartículas de alofán están dentro del rango nanométrico y tiene elementos característicos del alofán que son: aluminio, silicio y oxígeno; mientras que el espectrómetro infrarrojo permitió evaluar el espectro de vibración del alofán para realizar la comparación con estudios anteriores donde se verificó que las nanopartículas sintetizadas son de alofán.

En la caracterización en el microscopio electrónico de barrido se puede observar que algunas partículas superan los 100 nm, existen aglomeraciones producidas por la combinación o unión de las nanopartículas debido a que tienen un elevado nivel de energía en la superficie.

Se logró reducir el tiempo de enfriamiento de la solución aproximadamente de 120 min a 80 min para una concentración del 15% de propilenglicol con una apertura de válvula del 100%, mientras que para la concentración del 21% de propilenglicol el tiempo disminuyó de 130 min a 85 min.; con una apertura de válvula del 100% en la cual la bomba trabaja a su máxima eficiencia.

La velocidad de enfriamiento al 15% de propilenglicol aumentó de $0,22^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $0,310^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mientras que al 21% de propilenglicol aumentó de $0,221^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $0,310^{\circ}\text{C}/\text{min}$; resultados obtenidos con el 100% de apertura de válvula.

La medida de la capacidad calorífica se realizó experimentalmente porque no existen tablas específicas para esta solución que nos proporcionen información necesaria, los resultados obtenidos de la experimentación evidenciaron un leve incremento en la capacidad calorífica al añadir nanopartículas de alofán.

Debido a que existe una disminución en el tiempo de funcionamiento del equipo, se reduce también el consumo de energía, lo que implica un ahorro de dinero al tratarse de un equipo muy utilizado en industrias que requieren enfriar grandes volúmenes.

RECOMENDACIONES

Realizar pruebas con nanopartículas de alofán en equipos especializados que permita saber el comportamiento de las propiedades termodinámicas como son: viscosidad, calor específico y conductividad térmica.

Implementar un sistema de seguridad en el equipo chiller que pueda evitar daños en los componentes, además de construir un tanque de menor capacidad para que se puedan hacer pruebas con diferentes concentraciones de alofán, en virtud de que la adquisición de los reactivos para la síntesis del alofán en cantidades grandes representa un costo elevado.

Aplicar métodos de dispersión de nanopartículas que permitan disminuir las aglomeraciones y así obtener mejores resultados en la transferencia de calor de estos sistemas de refrigeración.

Se recomienda la utilización del propilenglicol con la adición de nanopartículas de alofán puesto que su nivel de contaminación es relativamente bajo en comparación con los refrigerantes secundarios tradicionales como son el etilenglicol cloruro de calcio, etc.

Realizar investigaciones con nanopartículas de alofán natural en sistemas de refrigeración, industria automotriz y otras áreas de aplicación, debido a que en el país existen suelos volcánicos ubicados alrededor de la región sierra centro-norte.

BIBLIOGRAFÍA

AEERHARD, A. F. & AERBERHARD, M. R. *Energía* [En línea]. Corrientes: s.f. Facultad de Ingeniería UNNE. [Consulta: 4 Diciembre 2018]. Disponible en: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/T4B.pdf>

ALMENDARIZ, Galo, & LARA GAVILANEZ, Diego Israel. Diseño, construcción y pruebas de un chiller para el laboratorio de transferencia de calor (Trabajo de titulación). [En línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba-Ecuador. 2014. p. 161. [Consulta: 2018-11-13]. Disponible en : <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3525>

ANDRANGO, Tatiana; et al. " Evaluación del uso de nanopartículas de dióxido de titanio de 85 [nm] para el mejoramiento de la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubos concéntricos con agua como fluido de trabajo". *ReserchGate* [En línea], 2013, (Ecuador),pp.1-8.[Consulta: 20 Julio 2018]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/269875248>

ARAKAWA, Shuichi; et al. "Allophane–Pt nanocomposite: Synthesis and MO simulation". *Applied Clay Science* [en línea], 2014, (Japón) 95, p. 6.[Consulta: 12 Agosto 2018]. ISSN 0169-1317] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131714001276>

BHANVASE, B. A; et al. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications: Intensified Heat Transfer Rate With the Use of Nanofluids*. [En línea]. India:Elsevier, 2018. [Consulta: 16 Septiembre 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128133514000420>

CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. *Manual de Aire Acondicionado*. Barcelona-España:Marcombo, 1980. pp 389-392.

CASTAÑEDA CONTRERAS, J. "Fabricacion de materiales amorfos y policristalinos con la ruta sol-gel". *Sociedad Mexicana de Física* [En línea], 2016, (México) 20(1), pp. 13-14. [Consulta: 13 Agosto 2018]. ISSN 0187-4713. Disponible en: <https://www.smf.mx/BOLETIN/2006/20-1/210-1.pdf>

CENGEL, Y. A. *Transferencia de Calor y Masa*. 3ª ed. Monterrey: McGraw-Hill Interamericana, 2007. ISBN-13: 978-970-10-6173-2, p

CENGEL, Yunus A & BOLES, Michael A. *Termodinamica*. [En línea] Octava. s.l. : Mc Graw Hill Education, 2015. [Consulta: 17 de agosto 2018]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/massachusetts-institute-of-technology/rock-physics/soluciones-de-libro/termodinamica-cengel-8-ed/2781075/view>

CUEVA, Jaime Renato & NOLE, Danny Ramiro. Evaluación del uso de nanopartículas de Titanio y Silicio para el mejoramiento del sistema de refrigeración de un vehículo [En línea]. (Trabajo de titulación). (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador. 2016. pp.7-10. [Consulta: 2018-08-10]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16701>

CHAMÉ FERNÁNDEZ, Karely. Síntesis y Caracterización de Nanopartículas Magnéticas. [En línea]. (Trabajo de titulación). (Maestría). Centro de investigaciones en Óptica, A.C. León-México. 2013. p.87. [Consulta: 2018-09-16]. Disponible en: <https://bibliotecas.cio.mx/tesis/15611.pdf>

CHE, N; et al. A review on the application of nanofluids in vehicle engine. *Elsevier*. [En línea], 2015, (Malasia) 68, pp. 85-90. [Consulta: 10 de agosto 2018]. Disponible en: <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/10468/1/A%20Review%20on%20the%20Application%20of%20Nanofluids%20in%20Vehicle%20Engine%20Cooling%20System.pdf>

Calor específico de un sólido y un líquido. Determinación del equivalente en agua del calorímetro. [En línea]. Torrelavega, 2010. [Consulta: 12 Diciembre 2018]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1568/course/section/2024/Prac06.pdf>

FAIRES, V. M. & SIMMANG, C. M. *TERMODINAMICA*. 6ª. Mexico: Distrito Federal: Hispano Americana, 1983, p.45

FLORES HERRERO, Nieves. *Calor específico de un metal* [En línea]. San salvador: Nieves Flores, 2012. [Consulta: 5 Diciembre 2018]. Disponible en: <https://docplayer.es/20335632-Universidad-don-bosco-departamento-de-ciencias-basicas-asignatura-fisica-ii.html>

GAGO, Sindy Milagros, & ROMÁN CHAMBERGO, River. Estudio termodinámico de la temperatura de congelación de mezclas refrigerantes etanol-agua y propilenglicol-agua. [En línea] (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado) Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo, Perú. 2017. [Consulta: 2018-09-15].

Disponible en : <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3769/Gago%20Alberto-Roman%20Chambergo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

GARCÍA AGUILAR, Julio César. Intoxicación por anticongelante automotriz [En línea](Trabajo de titulación). (Tesina) Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal de México, México. [Consulta: 2018-07-22]. Disponible en: https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/qfb/tesis/tesis_garcia_aguilar.pdf

GHONEIM, Adel, et al. "Effect of Copper adsorption on some Charge Characteristics of Nano-Ball Allophane". *International Journal of Soil Science* [en línea], 2006, (United State of America) 1(3), pp. 243-250. [Consulta: 16 agosto 2018]. ISSN 1816-4978. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269652218_Effect_of_Copper_Adsorption_on_Some_Charge_Characteristics_of_Nano-Ball_Allophane?fbclid=IwAR2XcCuCuAUZVQ_M4vKPqLdJHPbLCvUBnZlZIoKMFKKkvAT83eDu_KpoIc

GONZÁLEZ, Chirstian. Propiedades Geomecánicas de dos suelos de origen volcánico. [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago-Chile. 2012. [Consulta: 2018-08-12]. Disponible en : http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102764?fbclid=IwAR36bYKdIYQ4B2P83nuDLec5iVyLMHBUcvQjidIQgYmso33LDY_C-qrG5S0

GONZÁLES BESA, Yoalnda. Análisis comparativo de la influencia del anticongelante en una instalación solar térmica [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla-España. 2014. pp. 28-38. [Consulta: 2018-09-23]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90163/fichero/TFG++Yolanda+Gonz%C3%A1lez+Besa.pdf>

GUAMÁN, Paúl, & MUÑOZ, Christían Mauricio. Análisis de datos de un chiller para determinar el comportamiento de las curvas de enfriamiento del propilenglicol y su comparación con el cloruro de calcio. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, Riobamba-Ecuador. 2017. [Consulta: 2019-04-12]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/8078>

GUERRA GARCÉS, Daniel. Evaluación del efecto de un nanofluido en el desempeño térmico de un colector solar y un intercambiador de calor. [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Tecnologías de Información programa de graduados. Monterrey-Mexico. 2012. [Consulta: 2018-07-27]. Disponible en : <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/488/1/T-SENESCYT-0298%281%29.pdf>

GUPTA, Shipra Mital, & TRIPATHI, Manoj. "A review of TiO₂ nanoparticles". *Chinese Science Bulletin* [en línea], 2011, (India) 56(16),[Consulta: 13 agosto 2018]. Disponible en: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11434-011-4476-1.pdf?fbclid=IwAR3K_p6Kdo1arVtBXVZBLosdeaugva4FJfMkLeNyDCjKS9grkh8d6cjQzfc

HERNÁNDEZ, Diana, et al. Analysis of working nanofluids for a refrigeration system. *DYNA* [en línea],2016,(Colombia) 83(196), [Consulta: 04 Agosto 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/301579996_Analysis_of_working_nanofluids_for_a_refrigeration_system?fbclid=IwAR1U1GB6EKi77Tg5HRA95tXz9BjUulcljVW3aarjXwPBOMSvF4PtS1yfcG4

HUSSEIN, Adnan, et al. The Effect of Nanofluid Volume Concentration on Heat Transfer and Friction Factor inside a Horizontal Tube. *Journal of nanomaerials* [en línea], 2013,(Malasia) 2013(1), p. 12. [Consulta: 11 agosto 2018]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/859563>

INCROPERA, Frank, & DEWWITT, David P. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4ª ed. Mexico: Prentice Hall, 1999. ISBN 970-17-0170-4.

KUMAR, MUKESH; et al. "Thermo-physical profile of zinc oxide nanoparticles dispersed in aqueous solution of propylene glycol". *Journal of Molecular Liquids* [en línea], 2017, (India) 249, pp. 650-657. [Consulta: 24 septiembre 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321163379_Thermophysical_profile_of_zinc_oxide_nanoparticles_dispersed_in_aqueous_solution_of_propylene_glycol?fbclid=IwAR2RjIHFgRe9hPP0ADRj1FrYQwFEK59_9njzDw5vf39vVg4mG9EIcxhKQrE

LABRADA DELGADO, Gladis, & PEÑA MALDONADO, Ana. *Microscopios electronicos de Barrido (SEM)*. [en línea]. San Luis Potosi, s.f. [Consulta: 21 Septiembre 2018]. Disponible en: http://www.linan-ipicyt.mx/Microscopio_de_Barrido.html

LAGARDE SOTO, Ludwig. Desarrollo de una nanofluido en fase líquido con base en nanopartículas de CuO y Níquel en la absorción selectiva de radiación solar [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería. Querétaro-México. 2015. [Consulta: 13 Agosto 2018]. Disponible: <http://ri.uaq.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/7563/RI007415.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

LEVARD, C. "Structure and distribution of allophanes, imogolita and proto-imogolite in volcanic soils". *Geoderma* [en línea], 2012, 183-184 pp. 100-108. [Consulta: 11 agosto 2018] ISSN 0016-7061. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706112001280?fbclid=IwAR2pwS2_ck1JyitLpX7YFnz5wCKUZVQ9J14Ui1-_V2y8qpnxfGEg3QzOu5s

LI, Calvin; & PETERSON, G. P. "Experimental Studies of Natural Convection Heat Transfer of Al₂O₃/DI Water Nanoparticle Suspensions (Nanofluids)". *Advances in Mechanical Engineering* [en línea], 2010, (United State of America) 2. [Consulta: 29 Julio 2018]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/26842426>

LOPÉZ HERNÁNDEZ, Mario Humberto. *Microscopia Electronica de Barrido* [en línea]. Ciudad de México, s.f. [Consulta: 21 Septiembre 2018]. Disponible en: https://www.academia.edu/38122596/Microscopia_electronica_de_Barrido.pdf

MACAS SARABIA, José Stalin, & TOAINGA MOLINA, Esteban Eduardo. Repotenciación y analisis de datos del chiller del laboratorio de transferencia de calor, para la determinacion de las curvas de enfriamiento [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de Pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba-Ecuador. 2015. [Consulta: 2018-09-18]. Disponible en : <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4653/1/15T00623.pdf>

MÁRQUEZ, María; et al. "Influencia del surfactante en las propiedades morfológicas y eléctricas de nanopartículas de óxido de hierro". *Revista de Energía Química y Física* [en línea], 2017, (México) 4(13), pp. 22-28. [Consulta: 23 septiembre 2018]. ISSN 2410-3934. Disponible en: http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol4num13/Revista_de_Energia_Quimica_y_Fisica_V4_N13_3.pdf?fbclid=IwAR3ZnXIKevDQwapMVR1k1X90aeb1a2ZLeByz_M3r1Fz03jNpIJDF35avD8U

MORENO, Telmo, et al. "Análisis comparativo de la utilización de refrigerantes alternativos en un chiller". *Dominio de las Ciencias* [en línea], 2018, (Ecuador) 4(1), pp. 418-433. [Consulta: 11 agosto 2018]. ISSN 2477-8818. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6313249&fbclid=IwAR2pwS2_ck1JyitLpX7YFnz5wCKUZVQ9J14Ui1-_V2y8qpnxfgEG3QzOu5s

MULLER, Erich A. *Termodinámica Básica* [en línea]. 2ª ed. Caracas-Venezuela: Consultora kemiteknik C.A., 2002. [Consulta: 17 octubre 2018]. Disponible en: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/16075696.PDF?fbclid=IwAR2prHiYABEGnCAaA9xrO13PsyEFRbLNL2FFwfYRIg0DqEn6SXaQwrFbqCM>

MUÑOZ, José Rodrigo; et al. "Obtención de polvos cerámicos del sistema sbn (sr0.5ba0.5nb2o6) por el método de coprecipitación". *Scientia et Technica* [en línea], 2007, (Colombia) (36), pp. 297-298. [Consulta: 14 abril 2019]. ISSN 0122-1701. Disponible en: https://www.academia.edu/2520483/Obtenci%C3%B3n_de_polvos_cer%C3%A1micos_del_sistema_SBN_Sr0.5Ba0.5Nb2O6_por_el_m%C3%A9todo_de_coprecipitaci%C3%B3n

NDAYIRAGIJE, Samuel., & DELVAUX, Bruno. Coexistence of allophane, gibbsite, kaolinite and hydroxy-Al-interlayered 2:1 clay minerals in a perudic Andosol. *Geoderma* [en línea], 2013, (Belgium) 117(3-4), pp. 203-214. [Consulta: 20 agosto 2018]. ISSN 0016-7061. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00123-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00123-X)

NGUYEN, Van Son; et al. Dispersion of nanoparticles: From organic solvents to polymer solutions. *Ultrasonics Sonochemistry* [en línea], 2014, (France) 21(1), p. 149. [Consulta: 10 octubre 2018]. ISSN 1350-4177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.015>

OHASHI, F; et al. "Synthetic allophane from high- concentration solutions: nanoengineering of the porous solid". *Clay Minerals* [en línea], 2002, (Japón) 37(3), p. 454. [Consulta: 5 junio 2019]. ISSN 0009-8558. Disponible en: <https://sci-hub.tw/https://pubs.geoscienceworld.org/claymin/article-abstract/37/3/451/134975/synthetic-allophane-from-high-concentration?redirectedFrom=fulltext>

ORTIZ ARANGO, Juan Carlos. Modelación de la conductividad térmica de nanofluidos y de su aplicación como refrigerantes en microcanales [En línea]. (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química, Escuela de Ingenierías. Medellín-Colombia, 2014. [Consulta: 2018-07-28]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2269/TesisVersionFinal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PAREDES PEÑAFIEL, M., 2005. *Tesis de Pregrado*. Santiago de Chile: s.n.

QUISPE MEZA, Lucero, & TAZA ORDOÑEZ, Brenda del Rocío. Razón de flujo de gas refrigerante en estado dinámico en un sistema de refrigeración por compresión de vapor [En línea]. (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química Industrial. Huancayo-Perú, 2017. [Consulta: 2018-10-11]. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3797/Quispe%20Meza%20Taza%20Ordono%20c3%b1ez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RIBEIRO SALAZAR, Luis Rafael. Manual de Operción y Mantenimiento para los equipos de aire acondicionado del CC Parque Cerro Verde [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad Simón Bolívar, Decanato de Estudios Profesionales, Coordinación de Mecánica. Sartenejas-Venezuela. 2016. pp. 8-23. [Consulta: 25 julio 2018]. Disponible en: <http://159.90.80.55/tesis/000174824.pdf>

RUANO DOMÍNGUEZ, René. *Eficiencia Energética de los Sistemas de Refrigeración*. [en línea]. 2012. [Consulta: 04 Agosto 2018]. Disponible en: http://www.energianow.com/Articulos/sistema_refrigeracion.pdf

SAIDUR, R; et al. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2011, (Malasia) 15(3), pp. 1647-1649. [Consulta: 20 agosto 2018]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004041?via%3Dihub>

SILVA, Efrén; et al. *Alofan, una nanopartícula natural, presente en andosoles del Ecuador, propiedades, aplicaciones y perspectivas futuras.*, 2017, Riobamba: s.n.

STOECKER, Wilbert F. *Industrial Refrigeration Handbook* [en línea]. New York-USA: McGraw-Hill Education, 1998. [Consulta: 19 abril 2019]. Disponible en: <https://refacsmkn1crb.files.wordpress.com/2012/11/industrial-refrigeration-handbook-stoecker.pdf>

TAYLOR, Robert; et al. "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids". *Journal of Applied Physics* [en línea], 2013, (United of States) 113(1), pp. 1-5. [Consulta: 11 agosto 2018]. ISSN 1089-7550. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.4754271>

VALENZUELA, Ramiro. *Apuntes de Refrigeración*. Riobamba-Ecuador: s.n, 2010.

VARELA CUNAZZA, Francisco Andrés. Efecto del tipo de secado en las propiedades índice y compresibilidad de suelos de origen volcánico [En línea]. (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile-Chile. 2016. pp. 18-24. [Consulta: 2018-08-11]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140031>

WADA, Shin-Ichiro; et al. "Synthetic Allophane and Imogolite". *Journal of soil Science* [en línea], 2006, (Japón) 30(2), pp. 347-349. [Consulta: 12 agosto 2018]. ISSN 1365-2389. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/229970345_Synthetic_Allophane_and_Imogolite?fbclid=IwAR2XcCuCu-AUZVQ_M4vKPqLdJHPbLCvUBnZlZIoKMFKKkvAT83eDu_KpoIc

WANG, X.-Q. & MUJUNDAR, A. S., 2008. A review on nanofluids - Part I: Theoretical and numerical investigations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(4), pp. 613-630.

ZHOU, Le-Ping; et al. "On the Specific Heat Capacity of CuO Nanofluid". *Advances in Mechanical Engineering* [en línea], 2015, (China) 2(1), pp. 1-2. [Consulta: 10 agosto 2018]. ISSN 16878140. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2010/172085>

